

Dissertation

Generalisierung dreidimensionaler Gebäudedaten auf der Basis von Maßstabsräumen

Andrea Forberg

2005

Angaben in den Pflichtexemplaren der Dissertation

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation: Generalisierung dreidimensionaler Gebäudedaten auf der Basis von Maßstabsräumen

Verfasser: Andrea Förberg

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Kurt Brunner

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Helmut Mayer

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Liqiu Meng

Tag der Prüfung: 21.03.2005

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad: Doktor der Ingenieurwissenschaft (Dr. Ing.)

Neubiberg, den 06.04.2005

Zusammenfassung

Dreidimensionale (3D) Gebäudemodelle verlangen je nach Anwendung oder Blickpunkt nach unterschiedlicher Detaildichte, d.h. unterschiedlichen Maßstäben. Damit nicht jedes unterschiedlich detaillierte Modell aus grundlegenden Daten, wie z.B. Stereoluftbildern, erfasst werden muss, werden Methoden benötigt, mit denen aus einem detailreichen Modell weniger detaillierte Modelle abgeleitet werden können, d.h. mit denen das Modell generalisiert werden kann. Während für allgemeine 3D Objekte oder digitale Geländemodelle (DGM) eine große Zahl an Generalisierungsansätzen existiert, steht die Modellgeneralisierung von Objekten mit den speziellen Eigenschaften von Gebäuden, d.h. überwiegend rechten Winkeln zwischen den das Gebäude bildenden ebenen Flächen, bisher am Anfang der Entwicklung.

Diese Arbeit stellt einen neuen Ansatz zur automatischen Modellgeneralisierung von 3D Gebäudedaten auf der Basis der formal mathematisch definierten Maßstabsraumtheorie vor. Maßstabsräume sind umfassend theoretisch untersucht, d.h. es existieren Charakteristika, wie z.B. Isotropie und Homogenität, sowie Anforderungen, wie besonders Kausalität, welche besagt, dass Strukturen eines größeren Maßstabs einen Grund im feineren Maßstab haben müssen.

Für die Vereinfachung von 3D Gebäudemodellen werden speziell die Maßstabsräume mathematische Morphologie und Krümmungsraum auf 3D Vektordaten mit überwiegend rechtwinkligen Strukturen erweitert. Der erste Maßstabsraum wird durch das einheitliche Verschieben aller Flächen eines Modells in oder entgegen der Richtung ihrer Normalen realisiert, während bei Letzterem nur Flächen von Strukturen mit starker Krümmung bewegt werden und die Richtung der Bewegung in Bezug auf die Normalen nicht einheitlich ist. Der Begriff der „Krümmung“ wird dazu für rechtwinklige Strukturen näher untersucht. Nur mit mathematischer Morphologie können Gebäude (-teile) verschmolzen oder getrennt werden, wohingegen nur der Krümmungsraum für die Beseitigung von box- oder treppenförmigen Strukturen geeignet ist. Motiviert durch die bei der Umsetzung der beiden 3D Maßstabsräume auftretenden theoretischen und praktischen Probleme wurde ein neuer 3D Maßstabsraum entwickelt, der die Forderung nach Kausalität erfüllt. Dieser als „Parallelverschiebung“ bezeichnete Ansatz verbindet die Möglichkeiten der mathematischen Morphologie mit denen des Krümmungsraums und ist zudem schneller und allgemeingültiger.

Für die Behandlung von nicht-rechtwinkligen Strukturen, speziell für geneigte Dachstrukturen, wird ein neuer Ansatz vorgeschlagen, bei dem zusammenhängende Dachstrukturen (Dacheinheiten) ermittelt und ihre Flächen in die horizontale oder vertikale Richtung gezwungen werden. Er ist von einem kontinuierlichen Maßstabparameter abhängig und erfüllt das Kausalitätskriterium. Er kann daher als weiterer Maßstabsraum angesehen werden.

Zusammenfassend sind die Novitäten dieser Arbeit:

- Eingehende theoretische Untersuchung des Krümmungsraums für rechtwinklige aus ebenen Flächen aufgebaute 3D Strukturen
- Vorstellung und Untersuchung eines Generalisierungsansatzes, bestehend aus zwei Maßstabsräumen, welche die Forderung nach Kausalität erfüllen:
 - Parallelverschiebung zur effizienten Vereinfachung rechtwinkliger Strukturen und
 - Elimination geneigter Dachstrukturen

Die verschiedenen Ansätze zur Generalisierung rechtwinkliger Strukturen und die Elimination geneigter Dachstrukturen wurden an einer größeren Zahl generischer Gebäudemodelle erfolgreich getestet und zeigen das Potential einer maßstabsraumbasierten Generalisierung. Die Darstellung verbleibender Probleme und das Aufzeigen von Perspektiven runden die Arbeit ab.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Gliederung der Arbeit	3
2	Gebäudemodelle	4
2.1	3D Beschreibung von Gebäuden	4
2.1.1	3D Repräsentationen	4
2.1.2	Flächenbegrenzungsmodell	8
2.2	Semantische Charakterisierung von Gebäuden	10
3	Maßstabsräume	13
3.1	Maßstab und Maßstabsraum	13
3.2	Maßstabsräume in der Bildverarbeitung	14
3.2.1	Linearer Maßstabsraum	15
3.2.2	Mathematische Morphologie	16
3.2.3	Reaktions-Diffusionsraum	17
4	Generalisierung von Gebäudedaten	19
4.1	2D Generalisierung	19
4.1.1	Vereinfachung von 2D Gebäudegrundrissen	20
4.1.2	Maßstabsräume zur 2D Generalisierung	23
4.2	3D Generalisierung	26
4.2.1	Vereinfachung von 3D Gebäudedaten	26
4.2.2	Maßstabsräume zur 3D Generalisierung	29
4.2.3	Orthogonalisierung als Maßstabsraum	30
5	Vereinfachung rechteckiger 3D Gebäudemodelle	33
5.1	Mathematische Morphologie in 3D	33
5.2	Krümmungsraum in 3D	35
5.2.1	Untersuchungen zum Begriff „Krümmung“	35
5.2.2	Konvexität und Konkavität lokaler Strukturen	38
5.2.3	Krümmungsraum-Operationen	40
5.3	Parallelverschiebung	42

6	Behandlung nicht rechtwinkliger 3D Gebäudemodelle	47
6.1	Elimination geneigter Dachstrukturen	48
6.1.1	Orthogonalisierung einzelner Dachflächen	48
6.1.2	Bildung und Orthogonalisierung von Dacheinheiten	53
6.2	Orthogonalisierung der Wände	54
7	Experimente und Bewertung der Ergebnisse	56
7.1	Mathematische Morphologie	56
7.2	Krümmungsraum	59
7.3	Parallelverschiebung	62
7.4	Dachorthogonalisierung	69
7.5	Kombination von Parallelverschiebung und Dachorthogonalisierung	72
7.6	Bewertung der Ergebnisse und mögliche Erweiterungen des Ansatzes	77
7.7	Vergleich mit anderen Arbeiten	79
8	Zusammenfassung und Ausblick	81
	Literaturverzeichnis	84
	Dank	90

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Repräsentation räumlicher Strukturen zur Orientierung, Navigation oder Präsentation von Planungsergebnissen erfolgt neben der traditionellen Darstellung in Form von zweidimensionalen (2D) Karten immer häufiger auch durch dreidimensionale (3D) Modelle. Gründe hierfür sind die hohe Graphikleistung moderner Rechner und die zunehmende Verbreitung des Internets. Für urbane Bereiche gewinnen in diesem Zusammenhang virtuelle 3D Stadtmodelle an Bedeutung. Ihre Anwendungsgebiete sind vielfältig. Virtuelle Führungen, wie sie z.B. in (SCHILING und ZIPF 2002) angestrebt werden, werben um Touristen und helfen diesen, sich bereits im Voraus mit der räumlichen Struktur einer Stadt vertraut zu machen. Weitere Anwendungsbereiche umfassen Planungsvorhaben, Missionsplanungen und Simulationen, z.B. im Bereich der Stadtplanung, des Denkmalschutzes, des Katastrophenschutzes, der professionellen Flugsimulation oder der Funknetzplanung. Eine große Auswahl an Anwendungsbeispielen wird in (ALBERT et al. 2003) vorgestellt.

Der Detailreichtum der Modelle variiert abhängig vom Verwendungszweck. Dient das Modell touristischen Zwecken oder zur städtebaulichen Planung, ist eine hohe Detailtreue bzw. -dichte und ein damit verbundener hoher Wiedererkennungswert einzelner Gebäude erwünscht. Für die Simulation von Wellenausbreitungen, z.B. für die Funknetzplanung, ist z.T. ein Modell mit wenig Details vorteilhafter, da ansonsten die Berechnungen unnötig komplex und zeitaufwändig werden. Aber auch innerhalb einer Anwendung kann es sinnvoll sein, verschiedene Detailstufen verfügbar zu haben. In der Level of Detail (LOD) Repräsentation aus der Computer Graphik werden Objekte im Vordergrund mit all ihren Details dargestellt. Mit zunehmender Entfernung nehmen die Details, da sie nicht mehr auf dem Bildschirm dargestellt werden können, in diskreten Schritten ab, bis die Objekte in der Ferne nur noch als grobe Blöcke präsentiert werden (siehe z.B. Abb. 1.1). Die Zahl der LODs für eine Visualisierung ist nicht festgelegt, variiert aber für topographische Objekte, wie z.B. Gebäude, Straßen und Bäume, üblicherweise zwischen drei (SCHILCHER et al. 1998) und fünf (GRÖGER und KOLBE 2003). KOLBE und GRÖGER (2003) schlagen einen einheitlichen Standard für die Objektrepräsentation für 3D Stadtmodelle vor, bei dem auch die Relationen zwischen den unterschiedlich aufgelösten Modellen beschrieben werden.

Durch die von der Entfernung abhängende Darstellung von Repräsentationen unterschiedlicher Komplexität wird zum einen die Zahl der darzustellenden Polygone reduziert. Dies erhöht die Geschwindigkeit einer interaktiven Visualisierung, d.h. der Navigation des Nutzers durch die 3D Szene. Zum anderen kann die Übersichtlichkeit der Präsentation durch gezielte Auswahl verbessert werden. Wünscht z.B. der Nutzer eines 3D Stadtmodells, welches für touristische Zwecke konzipiert wurde, zunächst nur einen Überblick über eine Stadt oder einen Stadtteil, sind zu viele Details verwirrend und beeinträchtigen wie bei 2D Karten die Lesbarkeit. Bewegt er sich dagegen in das Modell hinein, z.B. in eine bestimmte Straße oder auf einen markanten Platz mit entsprechenden Sehenswürdigkeiten, sind die vorher den Überblick störenden Details für die Charakteristik und die Wiedererkennbarkeit unerlässlich.

Unterschiedliche Anwendungszwecke oder Blickwinkel erfordern also Repräsentationen mit verschiedenem Detaillierungsgrad. Um nicht für jeden Detaillierungsgrad ein neues Stadtmodell durch Rekonstruktion aus grundlegenden Daten, z.B. Stereoluftbildern, aufbauen zu müssen, sind Methoden erforderlich, mit deren Hilfe aus einem Modell mit hoher Detaildichte weniger detaillierte Modelle abgeleitet werden können. Dies kann als Generalisierung bezeichnet werden und ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Der Schwerpunkt liegt auf der Vereinfachung einzelner 3D Gebäude. Gebäude zeichnen sich durch einen hohen Anteil an planen, orthogonalen, parallelen und koplanaren Flächen aus. Ein Verfahren zur Vereinfachung von Gebäuden sollte diese Eigenschaften berücksichtigen und erhalten.

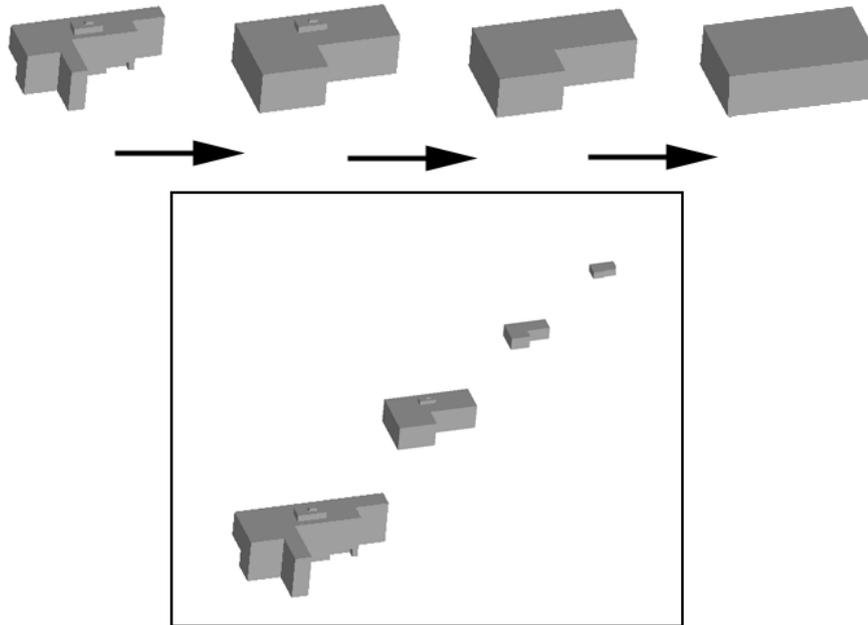


Abbildung 1.1: Level of Detail Darstellung: Objekte in größerer Entfernung werden mit weniger Details als Objekte im Vordergrund dargestellt.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur 3D Generalisierung wurde durch die im Bereich der Computer Vision und Bildanalyse genutzte Maßstabsraumtheorie inspiriert. Nach (TER HAAR ROMENY 2003) beschreibt ein Maßstabsraum jenen Raum, der entsteht, wenn ein Datensatz, z.B. ein 2D Bild, in verschiedenen Maßstäben gleichzeitig betrachtet wird. Er wird generiert, indem aus einer gegebenen Repräsentation eine Reihe weiterer Repräsentationen in unterschiedlichen Maßstäben abgeleitet wird, d.h. indem der Detaillierungsgrad einer Szene verändert wird. Verwendet werden Maßstabsräume z.B. zur automatischen Erkennung von Elementen mit signifikanten Formeigenschaften, d.h. in diesem Fall Elementen, welche über eine Vielzahl von Maßstäben erhalten bleiben (METZLER et al. 1999). Für die Ableitung der Repräsentationen mit verschiedenen Maßstäben stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Sie eignen sich wegen ihres Abstraktionsvermögens auch zur Generalisierung. Einige dieser Verfahren wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die automatische Generalisierung von 3D Gebäuden in Form von Vektormodellen mit weitgehend rechtwinkligen Strukturen übertragen. Während die Generierung eines Maßstabsraums im Bereich von Computer Vision und Bildanalyse meist zur Vorbereitung auf die Analyse bestimmter Merkmale über verschiedene Maßstäbe hinweg dient, steht in dieser Arbeit die Abstraktion bei der Maßstabsraumgenerierung im Vordergrund.

Spezifischer liefert die vorliegende Arbeit die technische Grundlage für eine Modellgeneralisierung in Form einer automatisierten Reduktion der Zahl der Flächen für einzeln stehende 3D Gebäudemodelle. Der vorgestellte Ansatz berücksichtigt die speziellen Eigenschaften von Gebäuden, wie z.B. die Orthogonalität von Flächen. Dadurch ist er im Kern auf Gebäudemodelle limitiert, deren Wandflächen exakt rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Dachflächen werden separat behandelt. Sie dürfen gegen die horizontale oder vertikale Hauptrichtung geneigt sein, müssen aber horizontale Traufen aufweisen. Die Orthogonalisierung des Gebäudegrundrisses ist, wie die Literatur zeigt, im Allgemeinfall schon in 2D ein komplexes Problem. Für sie werden Lösungsansätze aufgezeigt, eine Integration in die praktische Umsetzung des Ansatzes erfolgte aber nicht.

Die im Rahmen des Ansatzes entwickelten Verfahren sind rein geometrischer und topologischer Natur. Für den praktischen Einsatz muss der Ansatz geeignet parametrisiert werden. Die Parameter hängen von den real auftretenden Strukturen von Gebäuden sowie der abstrakten, konzeptionellen Vorstellung des Menschen von Gebäuden ab. Die für eine geeignete Parametrisierung notwendige Strukturerkennung ist nicht Teil des Ansatzes. Allerdings könnte der Ansatz genutzt werden, um signifikante Strukturen für die Strukturerkennung herauszuarbeiten. Für die in dieser Arbeit dargestellten praktischen Ergebnisse wurden die Parameter manuell sinnvoll gewählt.

1.2 Gliederung der Arbeit

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den zu vereinfachenden Gebäudemodellen. Es wird ein Überblick über verschiedene Repräsentationsformen von Geometrie gegeben und das gewählte Modell wird näher erläutert. Dies ist die Grundlage, um die Analysen und Objektmodifikationen, welche im Rahmen des später vorgestellten Generalisierungsansatzes durchgeführt werden, nachvollziehen zu können. Zusätzlich wird auf die Semantik von Gebäuden, d.h. ihre Eigenschaften, ihre Beziehungen zu anderen Siedlungselementen und die Beziehungen der einzelnen Gebäudeelemente untereinander, eingegangen.

In Kapitel 3 folgt auf die Definition der Begriffe Maßstab und Maßstabsraum eine kurze Zusammenfassung der allgemeinen Maßstabsraumtheorie. Der Schwerpunkt liegt auf für den Generalisierungsansatz wichtigen Methoden zur Maßstabsraumgenerierung. Diese umfassen den linearen Maßstabsraum, die mathematische Morphologie und den Reaktions-Diffusionsraum.

Eine Zusammenstellung bedeutender Arbeiten auf dem Gebiet der Generalisierung wird in Kapitel 4 gegeben. Aufgrund der Fülle an Arbeiten zu den unterschiedlichen Bereichen der 2D Generalisierung liegt der Fokus auf der Vereinfachung von Gebäudemodellen. Sowohl für die 2D Generalisierung als auch für die 3D Generalisierung von Gebäudedaten existieren Verfahren bzw. Ideen, welche durch die in Kapitel 3 vorgestellte Maßstabsraumtheorie motiviert oder beeinflusst wurden.

In Kapitel 5 wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur Vereinfachung rechtwinkliger Strukturen in Form von zwei verschiedenen Verfahren im Detail beschrieben. Dies ist zum einen die Vereinfachung, d.h. Reduktion der Zahl der Flächen, durch Kombination von 3D mathematischer Morphologie und dem von MAYER (1998b) eingeführten Krümmungsraum. Zum anderen ist dies die allgemeiner gehaltene Parallelverschiebung, deren Entwicklung durch die Probleme, die bei der Umsetzung des Krümmungsraums auftraten, motiviert wurde.

Für nicht orthogonale Strukturen, wie sie z.B. bei Dächern und größeren Gebäuden auftreten, wird in Kapitel 6 ein Verfahren zur Elimination geneigter Dachstrukturen vorgeschlagen. Das Verfahren berücksichtigt zusammenhängende Dachflächen in Form von Dacheinheiten. Die Handhabung nicht orthogonaler Wandstrukturen wird wegen ihrer Komplexität nur theoretisch diskutiert.

Die Darstellung, Beschreibung und Bewertung der Resultate, welche auf Grundlage des in Kapitel 5 und 6 beschriebenen Ansatzes erzielt wurden, erfolgt in Kapitel 7. Die bei der praktischen Umsetzung auftretenden Probleme werden beschrieben und Ideen für Lösungsansätze werden angesprochen und diskutiert. Die Stärken und Schwächen des Ansatzes werden zusammengefasst und der Ansatz wird mit anderen Arbeiten zur 3D Generalisierung von Gebäudedaten verglichen.

Eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf weitergehende Forschungsfelder, die sich aus dieser Arbeit ergeben, werden abschließend in Kapitel 8 dargestellt.

2 Gebäudemodelle

Für die Entwicklung eines Generalisierungsansatzes ist das Verständnis des generellen Aufbaus der zu vereinfachenden Objekte unumgänglich. Für Anwendungen aus dem Bereich der geographischen Informationssysteme unterscheidet BEHR (1998) zwischen den Entitäten selbst, ihren Eigenschaften und ihrer Beziehung zueinander. Der Begriff der Entitäten umfasst materielle Objekte, wie z.B. Gebäude oder Bäume, sowie nicht-materielle Sachverhalte, wie z.B. einmalige oder wiederkehrende Ereignisse. Für die explizite Modellierung von geometrischen Objekten wird diese Unterteilung in (RUAS und MACKANESS 1997) konkretisiert, indem in semantische Information, interne Geometrie und die geometrischen Relationen zwischen Objekten oder Objektteilen unterschieden wird. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden zur Vereinfachung einzelner Gebäude kommt der internen Geometrie die größte Bedeutung zu. Daher werden zunächst verschiedene geometrische Modelle zur Beschreibung von 3D Objekten vorgestellt. Dann werden die Elemente und Eigenschaften des verwendeten Flächenbegrenzungsmodells eingehender betrachtet. Abschließend wird der Zusammenhang von interner Geometrie, semantischer Information und geometrischer Relation für verschiedene Siedlungselemente, wie z.B. Gebäude und Straßen, aufgezeigt.

2.1 3D Beschreibung von Gebäuden

2.1.1 3D Repräsentationen

Für die Beschreibung von 3D Objekten stehen unterschiedliche Repräsentationsformen bereit. Welche Repräsentation für eine spezifische Aufgabe geeignet ist, hängt vom darzustellenden Objekt ab. Für die Modellierung von 3D Landschaften werden Digitale Geländemodelle (DGM), z.B. in Form unregelmäßiger Dreiecksnetze (TIN; triangulated irregular network), verwendet. Bei diesen so genannten 2,5D Modellen wird pro Lagepunkt nur eine Höhe modelliert. Sie können keine geschlossenen Objekte, bei denen mehrere Höhepunkte pro Lage vorkommen, wie dies bei Gebäuden der Fall ist, repräsentieren. Hierfür stehen Modellierungsformen zur Verfügung, welche von MÄNTYLÄ (1988) in Dekompositionsmodelle, konstruktive Volumenmodelle und Flächenbegrenzungsmodelle gegliedert werden. Diese eignen sich, wie im Weiteren dargestellt wird, unterschiedlich gut für die Beschreibung von Gebäuden.

Dekompositionsmodelle

Dekompositionsmodelle beschreiben 3D Objekte durch die Kombination einfacher Primitive, welche ohne Überlappungen aneinander gesetzt werden. Die einfachste Form eines Dekompositionsmodells ist das Voxelmodell (Exhaustive Enumeration; siehe Abb. 2.1). Dies ist die Erweiterung der Rastergrafik auf den 3D Raum. Während Bilder bzw. Objekte bei 2D Rastergrafiken aus Pixeln (Picture Element) zusammengesetzt sind, bestehen 3D Bilder oder Objekte aus Voxeln (Volume Element). Ein Voxel ist ein Element aus einer Menge gleichgroßer Kuben, welche den 3D Raum unterteilen (LATHAM 1995).

Das Voxelmodell benötigt sehr viel Speicherplatz und kann deswegen oft nur mit einer mittelmäßigen Genauigkeit repräsentiert werden. Nach (MÄNTYLÄ 1988) kann dieser Nachteil durch adaptive Unterteilungsschemata, wie z.B. Octree-Repräsentationen, binäre Raumunterteilungen oder Zell-Dekompositionen abgemildert oder beseitigt werden. Bei Octree-Repräsentationen wird der das Gesamtbild oder -objekt repräsentierende Kubus hierarchisch in Teilkubi halber Kantenlänge unterteilt, bis ein Teilkubus entweder vollständig in oder außerhalb des (Teil-) Objekts liegt. Bei der binären Raumunterteilung wird in zwei statt in acht Teile aufgeteilt

und bei Zell-Dekompositionen besteht ein Objekt nicht zwingend aus Kuben, sondern aus unterschiedlichen 3D Primitiven. Bei Dekompositionsmodellen können den einzelnen Primitiven Attribute, wie z.B. unterschiedliche Farben zugeordnet werden. Dies macht sie vor allem für medizinische Visualisierungen geeignet, bei denen nicht nur die Hülle sondern auch das volumetrische Innere der Objekte von Interesse ist. Für die Beschreibung von Gebäuden, d.h. geometrisch oft relativ einfachen Objekten, ist diese Art der Repräsentation nicht geeignet. Es wird viel Speicherplatz benötigt, Transformationen wie Translation und Rotation sind sehr rechenzeitintensiv (HAALA 1996) und vor allem können für Gebäude bedeutende Charakteristika wie Parallelität und Orthogonalität nicht explizit repräsentiert werden. Als Darstellung für geometrische Gebäudemodelle sind laut (WEIDNER 1997) daher nur konstruktive Volumenmodelle und Flächenbegrenzungsmodelle sinnvoll. Diese basieren auf einer Vektordarstellung.

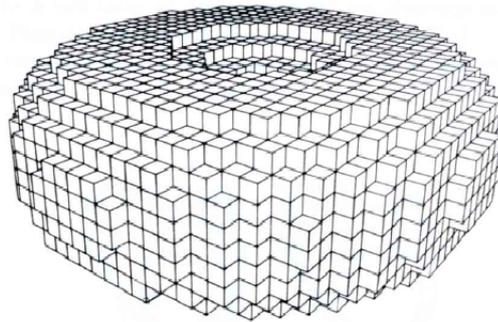


Abbildung 2.1: Voxelmodell: Ein Objekt wird aus gleichförmigen Kuben zusammengesetzt (MÄNTYLÄ 1988).

Konstruktives Volumenmodell

Bei volumenbasierten Repräsentationen, wie z.B. der Constructive Solid Geometry-Repräsentation (CSG), wird ein Objekt durch Volumenprimitive beschrieben. Diese werden bei CSG durch die logischen Operationen Vereinigung \cup , Differenz \setminus und Verschneidung \cap zu einem Objekt kombiniert. Im Gegensatz zu Dekompositionsmodellen können sich die Primitive gegenseitig durchdringen anstatt nur aneinandergereiht zu werden. Als Volumenprimitive kommen beliebige, meist in einer Datenbank gespeicherte 3D Objekte mit fester Topologie, aber variabler Geometrie in Frage. Gespeichert wird das Objekt in einem binären Konstruktionsbaum. Die Blätter enthalten die einzelnen Primitive sowie Informationen über deren geometrische Größen. Die Knoten geben Aufschluss über die logischen Operationen sowie ihre Transformationsparameter. Ein Objekt kann durch unterschiedliche Kombinationen von Grundprimitiven und logischen Operationen konstruiert werden (siehe Abb. 2.2). Damit ist die Repräsentation im Konstruktionsbaum nicht eindeutig (WEIDNER 1997).

Flächenbegrenzungsmodell

Beim Flächenbegrenzungsmodell (Boundary Representation; BRep) wird ein Objekt durch die es begrenzenden Flächen definiert (siehe Abb. 2.3). Die Flächen grenzen an den Kanten aneinander. Die topologischen Beziehungen zwischen den Flächen, d.h. die Information, welche Flächen durch welche Kanten verbunden sind, werden meist in einem Graphen festgehalten (siehe Abb. 2.4). Handelt es sich bei den Flächenprimitiven eines Flächenbegrenzungsmodells um plane Flächen, wird es auch als Polyedermodell bezeichnet. Im Gegensatz zum Volumenmodell ist das Flächenbegrenzungsmodell eine eindeutige Darstellung (WEIDNER 1997).

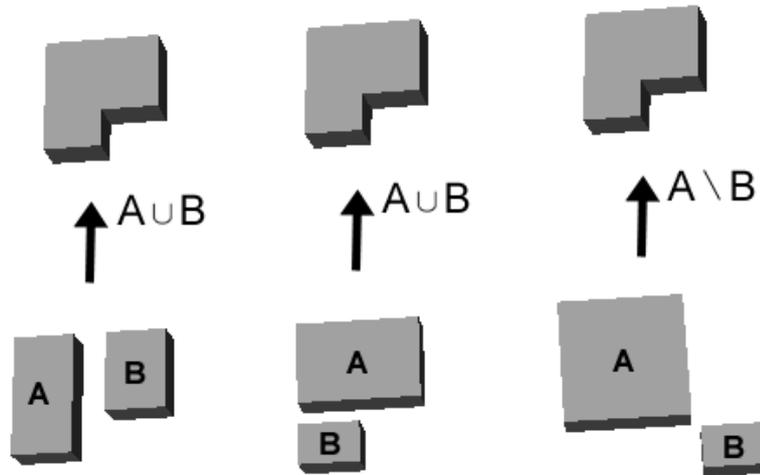


Abbildung 2.2: Volumenmodellierung: Ein Objekt wird aus Volumenprimitiven (hier Quadern) zusammengesetzt. Unterschiedliche Kombinationen verschiedener Primitive (A und B) führen zum gleichen Objekt.

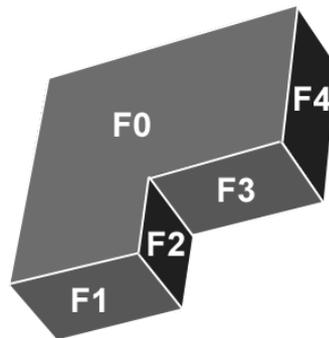


Abbildung 2.3: Flächenbegrenzungsmodell: Das Objekt ist aus den das Objekt begrenzenden Flächen (F_0, F_1, \dots, F_n mit $n = \text{Anzahl der Flächen} - 1$) zusammengesetzt.

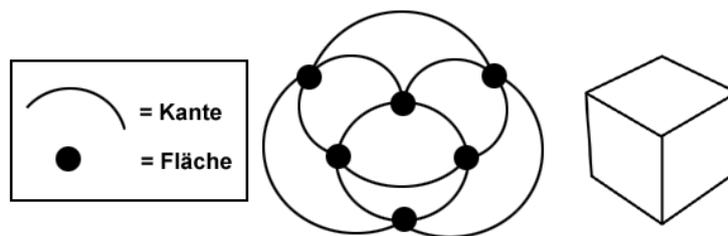


Abbildung 2.4: Kanten-Flächen-Graph eines Würfels (CORNEY und LIM 2001)

Volumen- versus Flächenbegrenzungsmodell für Gebäude

Für die Gebäuderekonstruktion wird für eine interaktive Rekonstruktion häufig die Volumenmodellierung verwendet, da sie für einen menschlichen Operateur intuitiver ist. Beispiele für die Nutzung von Volumenprimitiven zur Gebäuderekonstruktion aus Laserscannerdaten und Grundrissinformationen werden in (HAALA et al. 1997) und (BRENNER und HAALA 2000) beschrieben. Verfahren, bei denen ein Operateur Volumenprimitive interaktiv an Stereoluftbildmodelle anpasst, werden in (GÜLCH et al. 1999) und (ROTTENSTEINER und SCHULZE 2003) vorgestellt. Für die halbautomatische Rekonstruktion mit dem CyberCity-Modeler von GRUEN und WANG (1999), bei dem manuell gemessene Punktwolken automatisch zu Flächen gruppiert werden, wird dagegen aufgrund der vollständigen und eindeutigen Repräsentation auf das Flächenbegrenzungsmodell zurückgegriffen. Aus einer Volumenrepräsentation kann eindeutig ein Flächenbegrenzungsmodell abgeleitet werden. Die Transformation eines Flächenbegrenzungsmodells in eine Volumenrepräsentation ist hingegen nicht eindeutig möglich, da, wie z.B. in Abbildung 2.2 gezeigt, für die Konstruktion des Volumenmodells verschiedene Kombinationen von Primitiven und logischen Operationen möglich sind.

Wird eine Volumendarstellung gewählt, muss diese für die Visualisierung in ein Flächenbegrenzungsmodell konvertiert werden. Nur wenn explizit Oberflächen gegeben sind, können den Flächen Texturen zugewiesen und Sichtbarkeitsberechnungen durchgeführt werden. Weil der vorgeschlagene Ansatz in erster Linie auf der Modifikation der Flächen beruht, wird im Weiteren von der Datenstruktur der Flächenbegrenzungsmodelle ausgegangen.

Flächenbegrenzungsmodelle für Gebäude

WEIDNER (1997) nutzt für die Rekonstruktion von Gebäuden parametrische und prismatische Gebäudemodelle. Dies sind eingeschränkte Polyedermodelle. Parametrische Modelle besitzen eine feste Topologie und werden durch eine gebäudetypabhängige Anzahl von Parametern beschrieben (siehe Abb. 2.5). So wird ein Flachdachgebäude durch die Parameter Höhe, Breite, Tiefe, Position und Orientierung beschrieben. Für ein Satteldach kommt die Dachhöhe oder wahlweise wie in (HAALA 1996) der Neigungswinkel hinzu. Auf diese Weise wird eine Anzahl häufig vorkommender Gebäudetypen beschrieben. Diese werden für die Rekonstruktion ausgewählt und mit den spezifischen geometrischen Werten des jeweiligen Gebäudes versehen.

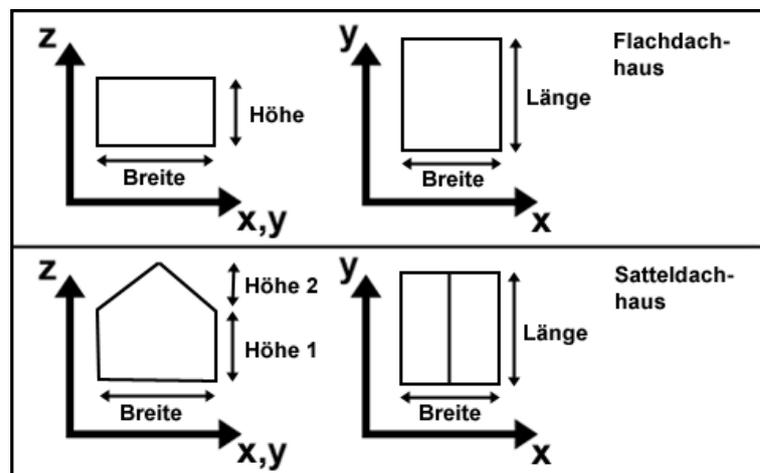


Abbildung 2.5: Parametrische Modelle definiert durch verschiedene Parameter, wie z.B. Länge, Breite und Höhe (WEIDNER 1997).

Prismatische Modelle werden durch ein Grundrisspolygon und die Gebäudehöhe definiert. Es können beliebig komplexe polygonale Grundrisse beschrieben werden. Nachteilig ist, dass nur Flachdachgebäude modelliert werden (siehe Abb. 2.6).

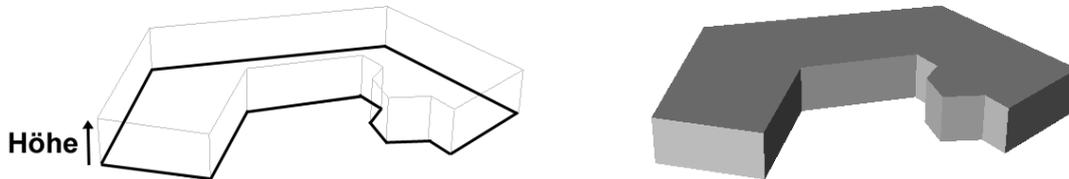


Abbildung 2.6: Prismatisches Modell zusammengesetzt aus polygonalem Grundriss und einheitlicher Höhe

Beide Repräsentationen haben den Nachteil, dass komplexe 3D Objekte, wie das mit einem Brückenteil versehene Gebäude in Abbildung 2.7, nicht (prismatisch) oder nur bei Modellierung einer absolut unrealistisch großen Zahl von Objekttypen (parametrisch) beschrieben werden können. Dienen die Modelle als 3D Primitive für eine Volumenmodellierung, können sie aber zu komplexen Objekten zusammengesetzt und anschließend wieder in ein Flächenbegrenzungsmodell transformiert werden.

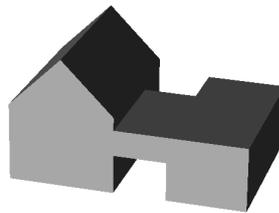


Abbildung 2.7: Komplexes Gebäude

Während für die Rekonstruktion von Gebäuden oft die oben beschriebenen einfachen parametrischen und prismatischen Gebäudemodelle genutzt werden, soll der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz beliebig detaillierte Gebäudemodelle vereinfachen können. Es werden daher allgemeine Polyeder als Ausgangsdaten angenommen. D.h., Gebäude bestehen aus beliebig vielen planen Flächen, die zu einem geschlossenen Objekt zusammengesetzt sind. Die Analyse der Objekte, welche Bestandteil des entwickelten Generalisierungsansatzes ist, erfolgt aufgrund der geometrischen und topologischen Relationen, welche im Flächenbegrenzungsmodell festgehalten sind. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich daher eingehender mit dem Flächenbegrenzungsmodell bzw. speziell mit dem Polyedermodell.

2.1.2 Flächenbegrenzungsmodell

Die Form eines Objekts wird nach (CORNEY und LIM 2001) in 3D im Wesentlichen durch drei geometrische Grundelemente beschrieben: Punkte, Kurven und Oberflächen. Diese beschreiben im Allgemeinfall nicht-abgegrenzte Geometrieelemente. So besitzt eine Gerade in 2D, welche durch die Formel $y = mx + b$ beschrieben wird, weder Anfangs- noch Endpunkt (siehe Abb. 2.8a). Für die Darstellung, Analyse und Modifikation eines endlichen Objekts ist diese Form der Beschreibung nicht direkt geeignet. Daher werden für das Flächenbegrenzungsmodell, dessen Name sich von der Begrenzung der geometrischen Grundelemente ableitet, die Grenzen einer Kurve

durch Punktpaare definiert (siehe Abb. 2.8b). Eine begrenzte Gerade wird im Weiteren als Kante bezeichnet. Analog dazu werden die Begrenzungen einer Oberfläche durch eine Menge von auf der Oberfläche liegenden, zusammenhängenden, begrenzten Kurven beschrieben. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass es sich für Gebäude darstellende Polyeder bei den begrenzten Kurven um Kanten handelt und die Oberflächen plan sind, d.h. dass alle Punkte und Geraden einer Oberfläche in der gleichen Ebene liegen.

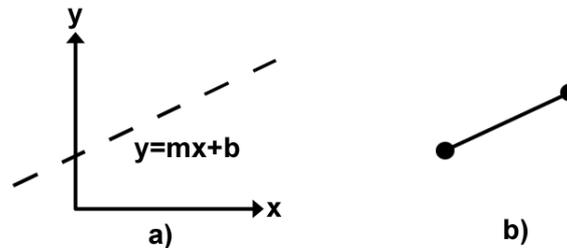


Abbildung 2.8: a) nicht-begrenzte Geometrie einer Geraden, b) begrenzte Gerade, d.h. Kante

Die Beziehungen zwischen geometrischen Elementen werden durch Topologie beschrieben. Diese hält fest, welche Punkte welche Kurven begrenzen und welche Kurven welche Oberflächen abgrenzen. Um zwischen begrenzter und nicht-begrenzter Geometrie unterscheiden zu können, werden für die begrenzten Elemente andere Namen verwendet. Ein eine Kurve begrenzender Punkt heißt Knoten oder in der Terminologie des ACIS 3D Modelers (www.spatial.com), der in dieser Arbeit verwendeten C++ Klassenbibliothek, Vertex. Ein zusammenhängendes Stück einer Kurve ist eine Kante oder Edge und ein zusammenhängendes Teil einer Oberfläche ist eine Fläche oder Face (siehe Abb. 2.9a, b, d). Ein Polyeder wird also durch seine Flächen begrenzt, welche durch zusammenhängende Kanten definiert werden, welche wiederum durch Knoten verknüpft sind. Zur Beschreibung der Topologie wird ein Objekt in weitere Elemente unterteilt. Diese ermöglichen die eingehende Analyse und eine Modifikation des Objekts. Für das weitere Verständnis sind vor allem die gerichteten Kanten (Coedges) und die aus ihnen gebildeten Schleifen (Loops) von Bedeutung. Eine Kante verbindet in einem so genannten mannigfaltigen Festkörper (Manifold Solid; s.u.) zwei Flächen miteinander und besteht aus zwei gerichteten Kanten mit entgegengesetzter Richtung. Die gerichteten Kanten innerhalb einer Fläche bilden eine Schleife, also ein geschlossenes Polygon (siehe Abb. 2.9c). Die Richtung (in oder gegen den Uhrzeigersinn) der gerichteten Kanten einer Schleife definiert die Richtung der Flächennormalen, d.h. es wird definiert, auf welcher Seite der Fläche das Objektivnere liegt.

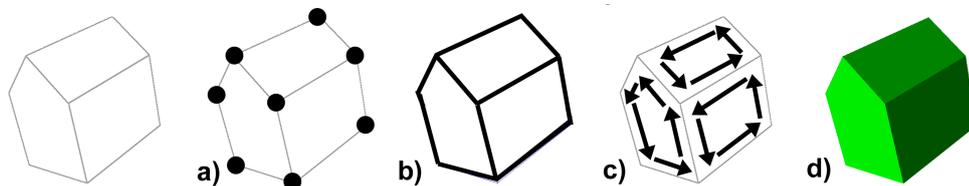


Abbildung 2.9: Gebäude mit Satteldach: a) Knoten, b) Kanten, c) gerichtete Kanten (in Schleifen angeordnet) und d) Flächen

Als mannigfaltiger Festkörper wird ein physikalisch realisierbares 3D Objekt bezeichnet. Definiert ist er entsprechend (MÄNTYLÄ 1988) als ein topologischer Raum, in dem jeder Punkt eine Nachbarschaft hat, welche äquivalent zu einer offenen Scheibe im \mathbb{R}^2 ist. Ein mannigfaltiges Objekt unterliegt somit gewissen Einschränkungen. Neben der Bedingung, dass jede Kante zwei Flächen miteinander verbindet, dürfen sich Flächen und Kanten nicht selbst schneiden und jedes Element muss begrenzt sein (siehe Abb. 2.10).

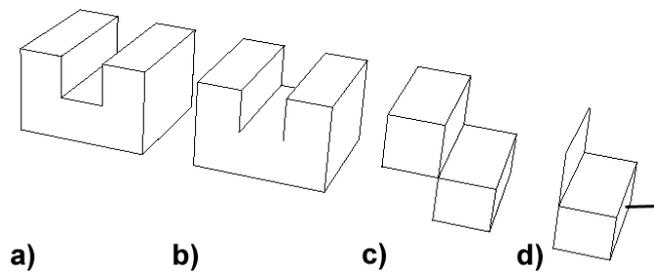


Abbildung 2.10: Unterschiedliche Festkörper: a) mannigfaltig, b) unvollständig oder semi-begrenzt (zwei Flächen fehlt eine Kante), c) nicht-mannigfaltig (eine Kante gehört zu mehr als zwei Flächen), d) multi-dimensional

Die Änderung der Topologie eines mannigfaltigen Objekts erfolgt grundlegend über eulersche Operationen. Diese dienen z.B. dazu, Flächen, Knoten oder Schleifen aufzuspalten oder miteinander zu verschmelzen. Jede einzelne Operation beinhaltet spezifische Bedingungen. So müssen z.B. für die Aufspaltung einer Fläche in zwei Flächen zwei entgegengesetzt gerichtete Kanten eingeführt werden, welche zwei gegebene Knoten verbinden. Eine erfolgreiche Anwendung der Operationen ist nur möglich, wenn für die jeweilige Operation geltende Vorbedingungen erfüllt sind. Wie in (MAYER 1998b) gezeigt wird, kann die Modifikation eines Objekts nur auf Grundlage von eulerschen Operationen daher je nach Komplexität des Objekts sehr aufwändig werden. Mit geeigneter Software kann der Modifikationsaufwand allerdings in Grenzen gehalten werden. Der hier für die Umsetzung verwendete ACIS 3D Modeler stellt Funktionen für lokale Operationen wie das Verschieben von Flächen bereit. Er hat gegenüber dem von MAYER (1998b) verwendeten CGAL (Computational Geometry Algorithms Library, <http://www.cgal.org>) den großen Vorteil, dass die bei der Verschneidung meist notwendigen Topologieänderungen automatisch berücksichtigt werden. Eulersche Operationen wie das Verschmelzen zweier Flächen müssen nicht explizit initiiert werden, sondern sind implizit durch die verwendete Funktion abgedeckt.

2.2 Semantische Charakterisierung von Gebäuden

Für die Modellierung sowie für eine den lokalen Gegebenheiten angemessene Generalisierung von Gebäudedaten ist es wichtig, nicht nur den geometrischen Aufbau des das Gebäude repräsentierenden Polyeders zu kennen, sondern auch die semantischen Relationen zwischen den einzelnen Komponenten eines Gebäudes sowie zwischen den verschiedenen Objekten einer Siedlungsstruktur. Für diesen Zweck kann ein semantisches Netz auf der konzeptionellen Ebene (BRACHMAN 1979) verwendet werden (siehe Abb. 2.11). In diesem werden Objekte als Konzepte repräsentiert und die Relationen sind auf wenige grundlegende Relationen reduziert.

In der geometrischen Ebene des semantischen Netzes findet sich in vereinfachter Form der in Abschnitt 2.1.2 beschriebene Aufbau eines Polyeders. Knoten sind Teile einer Kante, diese hat als Spezialisierung die gerichtete Kante. Mehrere gerichtete Kanten beschreiben eine Fläche, und mehrere Flächen bilden das Polyeder. Neben 3D Objekten existieren in einer Siedlungsstruktur auch 2D und 2,5D Objekte, die durch Flächen repräsentiert werden. Linienförmige Objekte werden durch langgestreckte Flächen dargestellt. Objekte können je nach Maßstab mit unterschiedlichen Geometrietypen repräsentiert werden. In (SCHOPPMAYER und HEISSER 1995) und (BOBZIEN und MORGENSTERN 2002) wird gezeigt, dass in 2D ein Übergang von einer Fläche zu einer Linie, von einer Fläche zu einem Punkt und von einer Linie zu einem Punkt möglich ist. So kann eine Straße in einem großen Maßstab als langgestreckte Fläche und in einem kleinen Maßstab als Linie dargestellt werden. In 3D ist dies für die in 2D darstellbaren Straßen ebenfalls denkbar, für 3D Gebäude ist ein solcher Geometrietyppwechsel aber nicht zu erwarten.

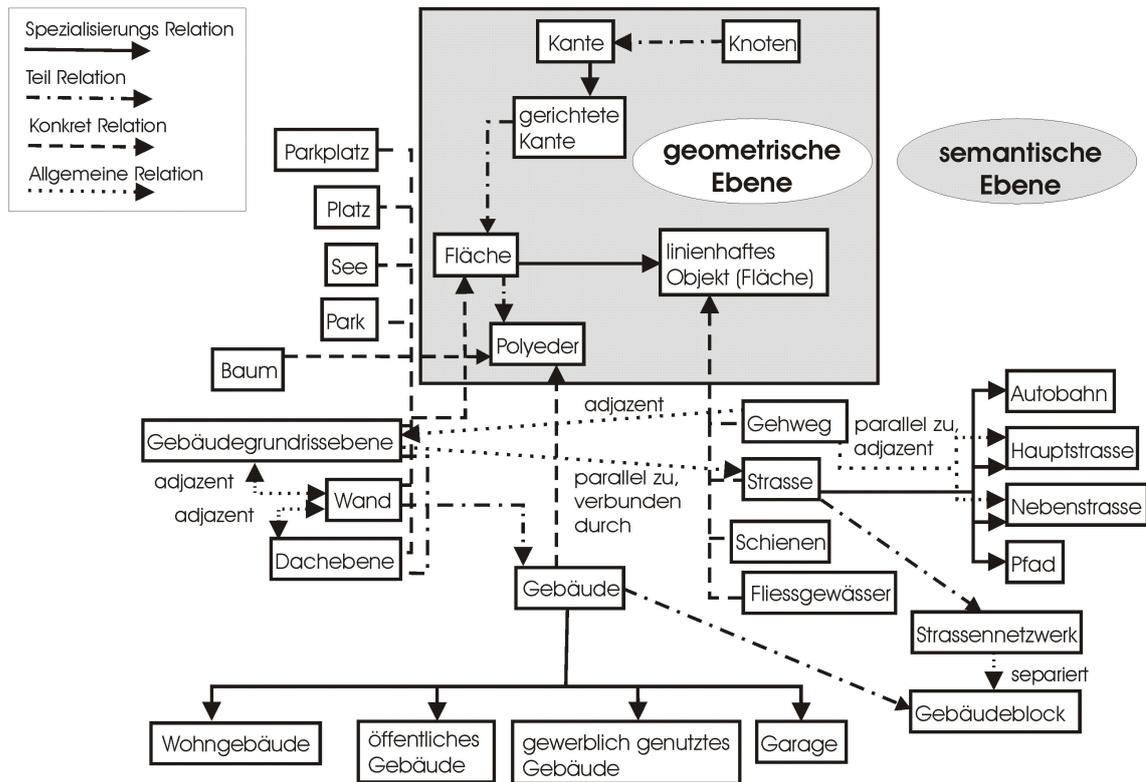


Abbildung 2.11: Semantisches Netz für Gebäude und die sie umgebenden Siedlungsstrukturen

In der semantischen Ebene finden sich zum einen Objekte, die als Polyeder und zum anderen Objekte, die als 2D oder 2,5D Objekte gehandhabt werden können. Die 3D Objekte umfassen Gebäude und Bäume und die 2D oder 2,5D Objekte beinhalten flächenhafte Objekte, wie z.B. Plätze und Seen sowie linienförmige Objekte wie Straßen, Gehwege, Flüsse und Schienen.

Gebäude und Straßen sind meist parallel und untereinander, evtl. durch Gehwege, verbunden. Gebäude bilden Gebäudeblöcke und Straßen bilden Netzwerke, welche die Gebäudeblöcke voneinander trennen. Für individuelle Gebäude ist der Grundriss adjazent zu den Wänden, und diese wiederum sind adjazent zu den Dachflächen. Gebäudegrundrissebene und Dachebene berühren sich für gewöhnlich nicht. Alle drei Elemente sind Teil eines Gebäudes. Geometrisch zu erkennen sind die einzelnen Komponenten an ihrer Relation zum Koordinatensystem. Die Gebäudegrundrissebene ist horizontal und besitzt den niedrigsten z-Wert, Wände sind vertikal, Dachebenen sind geneigt, d.h. weder horizontal noch vertikal, oder ebenfalls horizontal, dann aber höher gelegen als die Grundrissebene.

Neben den topologischen Relationen können Gebäuden semantische Attribute zugewiesen werden. So wird z.B. zwischen verschiedenen Nutzungsarten unterschieden. Für die Generalisierung ist es sinnvoll, Wohngebäude anders zu behandeln als öffentliche oder gewerblich genutzte Gebäude. Dies gilt insbesondere für die Zusammenfassung und Eliminierung. Tabelle 2.1 zeigt einen Auszug aus der Liste der im Basis DLM (Digitales Landschaftsmodell) für 2D Gebäude verwendeten Attribute aus dem ATKIS-OK (Objektartenkatalog des Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystems, <http://www.atkis.de>). Zusätzlich können Attribute wie Baujahr, Baustil oder Baumaterialien verwendet werden. Bei den Attributen kann in qualitative und quantitative Attribute unterschieden werden. Nach (MENG 2000) wäre z.B. eine qualitative Beschreibung einer Ortslage 'mit städtischer Ausprägung', während 'Bauwerkdicke' und 'höchste Höhe' die Ortslage quantitativ beschreiben.

GFK	Gebäudedefunktion	OFL	Lage zur Erdoberfläche
1110	Verwaltung	1100	auf der Erdoberfläche
1111	Parlament	1200	unter der Erdoberfläche
1112	Rathaus	1400	aufgeständert
1113	Postamt	PLZ	Postleitzahl
1114	Zollamt		- tatsächlicher Wert
1115	Gericht	WDM	Widmung
1116	Wetterstation	1202	Baudenkmal
1120	Bildung und Forschung	9997	Attribut trifft nicht zu
1121	Schule	WGF	Weitere Gebäudedefunktion
	...	1000	Apotheke
HHO	Höhe des Objekts	2000	Polizeiwache
	- tatsächlicher Wert in m	3000	Rettungsstelle
HRG	Herausragendes Gebäude		...
1000	Hochhaus	ZUS	Zustand
9997	Attribut trifft nicht zu	1100	in Betrieb
NTZ	Nutzung	1200	außer Betrieb, stillgelegt
1100	privat	1500	bewohnt
1200	öffentlich	1700	verfallen, zerstört ('Ruine')
1400	militärisch	1800	verlassen ('Wüstung')
1500	kirchlich		
9999	sonstiges		

Tabelle 2.1: Auszug von Attributen des ATKIS-OK für Gebäude im Basis DLM.

3 Maßstabsräume

Die Maßstabsraumtheorie bildet die Basis für den in dieser Arbeit entwickelten Ansatz zur Generalisierung von 3D Gebäudedaten. Zum besseren Verständnis werden zunächst die grundlegenden Begriffe Maßstab und Maßstabsraum erläutert. Nach einer kurzen Einführung in die allgemeine Maßstabsraumtheorie wird anschließend näher auf einzelne, für diese Arbeit bedeutende Maßstabsräume aus der Bildverarbeitung eingegangen. Im Einzelnen sind dies der lineare Maßstabsraum, die mathematische Morphologie und der Reaktions-Diffusionsraum. Bei der Beschreibung des Letzteren, welcher die Eigenschaften des linearen Maßstabsraums mit denen der mathematischen Morphologie kombiniert, spielen so genannte Maßstabsraumereignisse (Schocks) eine wichtige Rolle. Diese sind von besonderer Bedeutung für die Generalisierung.

3.1 Maßstab und Maßstabsraum

Maßstab

Der Begriff Maßstab sowie der verwandte Begriff Auflösung werden je nach Anwendung für verschiedene Sachverhalte genutzt. BIAN (1997) unterscheidet z.B. zwischen kartographischem Maßstab, geographischem Maßstab, Auflösung und operationellem Maßstab.

- Der kartographische Maßstab ist der Maßstab von Karten, d.h. das Verhältnis einer Strecke in einer Karte zu der korrespondierenden Strecke in der Natur. Eine Karte enthält in der Regel desto mehr Details je größer ihr Maßstab (und je kleiner die Maßstabszahl) ist.
- Der geographische Maßstab bezeichnet die räumliche Ausdehnung eines Untersuchungsgebiets. Im Gegensatz zum kartographischen Maßstab bedeutet hierbei ein großer Maßstab ein großes Untersuchungsgebiet.
- Der Begriff Auflösung steht für die feinste diskrete Unterteilung eines räumlichen Datensatzes. Feinere Unterteilungen entsprechen einem feineren Maßstab bzw. einer feineren Auflösung.
- Der operationelle Maßstab nimmt Bezug auf den Maßstab, in dem ein Phänomen auftritt. Ein Wald tritt in einem größeren operationellen Maßstab (aber kleineren kartographischen Maßstab) auf als ein einzelner Baum, oder bezogen auf das hier behandelte Thema: Eine Stadt manifestiert sich in einem größeren operationellen Maßstab als ein einzelnes Gebäude.

Auflösung kann außerdem je nach betrachtetem Medium unterschiedlich definiert sein. Nach (ALBERTZ 2001) wird z.B. die Auflösung von fotografischen Bildern mit Hilfe von Testtafeln ermittelt und in visuell unterscheidbaren Linien pro Millimeter angegeben, während die Auflösung von Scanner- oder Radarbildern, also Rasterdaten, durch die Länge und Breite eines Bildelements (Pixel) beschrieben ist.

Maßstabsraum

Jedes Objekt hat einen bestimmten Maßstabsbereich, in dem es repräsentierbar ist. Werden für einen Baum die Relationen zu anderen Bäumen, z.B. in einem Wald, studiert, ist ein anderer Maßstab notwendig als wenn der einzelne Baum analysiert wird oder die Struktur eines einzelnen Blattes des Baumes. Die Merkmale einer Repräsentation besitzen also oft nicht den gleichen operationellen Maßstab. Um ein Objekt möglichst in allen

Facetten automatisch analysieren und interpretieren zu können, ist es sinnvoll, seine Repräsentation in allen geeigneten Maßstäben zu betrachten. Eine Möglichkeit hierfür besteht darin, eine Ein-Parameter-Familie von abgeleiteten Signalen zu generieren, die als Maßstabsraum bezeichnet wird. Bei der Ableitung der Signale, welche nur in Abhängigkeit vom jeweiligen Maßstab, dem so genannten Maßstabsparameter, erfolgt, sollen feinmaßstäbliche Details sukzessive unterdrückt werden.

3.2 Maßstabsräume in der Bildverarbeitung

Im Bereich Computer Vision bzw. Bildanalyse werden Maßstabsräume für die Objekterkennung bzw. Objektextraktion aus Bildern, also aus 2D Rasterdaten, genutzt. Ein Maßstabsraum wird erstellt, indem von einem Bild mehrere Repräsentationen mit unterschiedlichem Maßstab abgeleitet werden.¹ Die verschiedenen detaillierten Repräsentationen werden durch die Anwendung von Filtern erzeugt. Hierzu stehen Filter mit teilweise sehr unterschiedlichem Charakter zur Verfügung.

Für die Bildanalyse werden die im Bild vorhandenen Objektstrukturen entweder, wie z.B. bei (MAYER und STEGER 1998), im geeigneten Maßstab analysiert oder, wenn keine Information über den geeigneten Maßstab vorliegt, über verschiedene Maßstäbe verfolgt und aufgrund unterschiedlicher Attribute bewertet. Die Attribute sind maßstabsabhängige Größen, wie z.B. die Entstehung oder Lebensdauer eines Objekts, morphologische Attribute, wie z.B. Größe oder Kompaktheit, sowie grauwertspezifische Attribute, wie z.B. Mittelwert, Varianz oder Entropie (METZLER et al. 2002).

Der Begriff des Maßstabsraums wurde von WITKIN (1983) geprägt, angewandt zunächst auf eindimensionale (1D) Signale $f(x)$. Er definiert den Maßstabsraum für 1D Signale als eine Ebene, die durch x , die unabhängige Variable des Signals, und den Maßstabsparameter $\sigma \in R_+$ aufgespannt wird. Um einen kontinuierlichen Maßstabsraum zu erhalten, wurde von WITKIN (1983) als Maßstabsraumparameter die Standardabweichung des Gaußfilters verwendet, mit dem das Signal gefaltet wird. Der Gaußfilter hat in 1D die Eigenschaft, dass für alle Signale die Zahl der lokalen Extrema der gefalteten Signale kleiner oder gleich der Zahl der Extrema des originalen Signals ist. Es gilt sogar, dass alle Extrema, die in einem beliebigen Maßstab beobachtet werden, eine Entsprechung im originalen (feinsten) Maßstab besitzen.

Nach ersten Überlegungen durch WITKIN (1983) erfolgte eine formale Beschreibung des 2D Maßstabsraums durch KOENDERINK (1984). Er unterscheidet zwischen innerem und äußerem Maßstab. Der innere Maßstab korrespondiert mit jenem Maßstab, bei dem Substrukturen eines Objekts sichtbar sind. Dieser ist von der Auflösung des Bildes begrenzt. Abhängig davon, ob es sich um fotografische oder digitale Bilder handelt, bezieht sich die Auflösung z.B. auf die Körnung oder die Pixelgröße. Der äußere Maßstab entspricht dem kleinstmöglichen Fenster, welches das Objekt oder Merkmal komplett enthält. Er ist durch die finite Größe des Bildes beschränkt. Das Intervall für die Beobachtungen eines Objekts ist begrenzt durch den äußeren und den inneren Maßstab. Für einen Baum wären das z.B. 10m und 10cm.

Bei der Erweiterung des Maßstabsraums auf 2D Bilder setzt sich dieser aus drei Variablen zusammen: x und y sind die Bildkoordinaten und σ misst den inneren Maßstab. Als Forderungen für eine Maßstabsraumgenerierung werden die Begriffe Kausalität, Homogenität und Isotropie eingeführt. Das Prinzip der Kausalität besagt, dass alle Merkmale eines gröbereren Maßstabs einen Grund im feineren Maßstab haben müssen. Homogenität (Ortsunabhängigkeit) und Isotropie (Richtungsunabhängigkeit) bedeuten, dass der innere Maßstab nur von σ

¹Gemäß dem Nyquist- oder Sampling-Theorem können Bilder mit gröberem Maßstab ohne Informationsverlust unterabgetastet werden, was zu Bildpyramiden (BURT und ADELSON 1983) führt. Auf diese wird in dieser Arbeit genauso wenig eingegangen wie auf ihre Nutzung, z.B. zur Bildorientierung. In praktischen Anwendungen wird bei gröberem Maßstab aus Effizienzgründen allerdings praktisch immer mit unterabgetasteten Bildern gearbeitet.

abhängt und nicht von x und y bzw. dem Winkel. Dies vereinfacht die spätere Analyse, also den Vergleich von Merkmalen in unterschiedlichen Maßstäben. Da nur eine auf dem Gaußfilter basierende Maßstabsfolge den Forderungen nach Kausalität, Homogenität, Isotropie und einem kontinuierlichen Maßstabsparameter entspricht, hat der Gaußfilter eine besondere Bedeutung für die Einbettung eines Bildes in eine Ein-Parameter-Familie. Eine Erweiterung für kontinuierliche Signale beliebiger Dimension N wird in (LINDBERG 1994) vorgestellt.

Der Gaußfilter ist zwar ein bedeutender, aber trotzdem nur einer von verschiedenen Filtern, die zur Erstellung eines Maßstabsraums geeignet sind. In dieser Arbeit wird auf der Grundlage von Maßstabsräumen eine Methode zur Generalisierung von Gebäudedaten abgeleitet. Deswegen werden nur die hierfür relevanten Filterverfahren behandelt und es wird nur auf deren spezifische Eigenschaften eingegangen.

3.2.1 Linearer Maßstabsraum

Die mittels des Gaußfilters gewonnene Ein-Parameter-Familie von abgeleiteten Signalen wird als linearer Maßstabsraum bezeichnet. Sie vereinigt Kausalität, Isotropie und Homogenität, glättet die Bildfunktion kontinuierlich (KOENDERINK 1984) und erfüllt die so genannte Diffusionsgleichung:

$$\frac{\delta L}{\delta t} = \frac{1}{2} \nabla^2 L = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta^2 L}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 L}{\delta y^2} \right), \quad (3.1)$$

mit $t = \sigma^2$. Für die Repräsentation $L_\sigma(x, y)$ im Maßstabsraum beschreibt diese das differenzielle Verhältnis zwischen maßstäblicher (Maßstab σ) und räumlicher (Koordinaten x, y) Bewegung. Die Faltung mit dem Gaußfilter $g : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}_+ \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ ist für den unendlichen Funktionsbereich die Lösung für die Diffusionsgleichung und ist für 2D folgendermaßen definiert:

$$g_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$

Es gilt $L_\sigma(x, y) = g_\sigma(x, y) * f(x, y)$ mit der Randbedingung $L_0 = f(x, y)$.

Abbildung 3.1a zeigt das Bild eines geometrischen Objekts in vier unterschiedlichen Maßstäben, drei davon abgeleitet durch gaußsche Glättung. Diese Repräsentationen wurden für Abbildung 3.1b einer Schwellwertoperation unterzogen. Je nach Maßstab können verschiedene topologische Ereignisse beobachtet werden. Bei $\sigma = 5$ spaltet sich das Objekt in zwei Objekte auf und bei $\sigma = 20$ verschmelzen diese wieder zu einem Objekt. Auf diese und weitere so genannte Maßstabsraumereignisse wird in Abschnitt 3.2.3 in Form so genannter Schocks näher eingegangen.

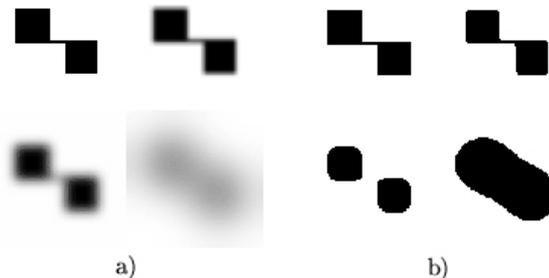


Abbildung 3.1: a) Anwendung des Gaußfilters (von links nach rechts und von oben nach unten: $\sigma = 0, \sigma = 2, \sigma = 5, \sigma = 20$), b) Darstellungen nach Schwellwertbildung (MAYER 1998b)

Durch Anwendung des Gaußfilters erfolgt demnach je nach Maßstab zum einen eine Vereinfachung, bei der das dünne Verbindungsstück eliminiert wird, und zum anderen eine Aggregation der beiden entstandenen Objektteile. An diesem Beispiel wird der potenzielle Nutzen von Maßstabsräumen für die Generalisierung, besonders für

die Vereinfachung und Zusammenfassung (Aggregation), deutlich. Störend ist allerdings die ebenfalls zu beobachtende Abrundung der Ecken, was den linearen Maßstabsraum als für die Gebäudegeneralisierung ungeeignet erscheinen lässt.

3.2.2 Mathematische Morphologie

Mathematische Morphologie, deren formale Theorie wesentlich durch SERRA (1982) entwickelt wurde, ist eine Möglichkeit, um in der Bildverarbeitung die Form von Objekten zu manipulieren. Der morphologische Maßstabsraum entsteht durch die Veränderung der Größe eines so genannten Strukturelements.

Morphologische Maßstabsräume sind homogen und erfüllen die Forderung nach Kausalität. Zur Beschreibung der mathematischen Morphologie wird die Sprache der Mengenlehre genutzt. Die Transformationen der mathematischen Morphologie können auf Mengen beliebiger Dimension angewandt werden und sind nach (HARALICK und SHAPIRO 1992) für N-dimensionale Binärbilder wie folgt definiert:

$$\text{Dilation (Dilatation)} : A \oplus B = \{c \in E^N \mid c = a + b \text{ für einige } a \in A \text{ und } b \in B\} \quad (3.3)$$

$$\text{Erosion} : A \ominus B = \{x \in E^N \mid x + b \in A \text{ für alle } b \in B\} \quad (3.4)$$

$$\text{Opening (Öffnen)} : A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3.5)$$

$$\text{Closing (Schließen)} : A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3.6)$$

Dilatation kombiniert zwei Mengen A und B durch Minkowski-Addition ihrer Elemente a und b . A wird oft als die Ausgangsmenge, z.B. ein binäres Bild, und B als das Strukturelement gesehen, mit welchem A bearbeitet wird. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft zwei Binärbilder (Ausgangsbild A und Strukturelement B) und das Ergebnis der Dilatation.

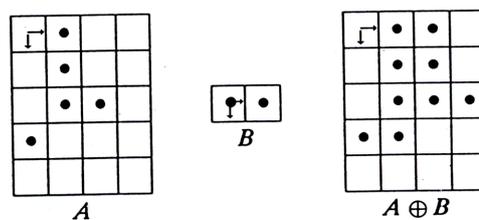


Abbildung 3.2: Dilatation zweier Binärbilder (HARALICK und SHAPIRO 1992). Das aus zwei rechtwinklig angeordneten Pfeilen bestehende Symbol in den Kästchen bezeichnet den Ursprung des Koordinatensystems des jeweiligen Bildes.

Dilatation und Erosion, welche durch Minkowski-Subtraktion als Gegenstück zur Dilatation charakterisiert ist, sind die Grundoperationen, aus denen Opening und Closing bestehen. Die Kombination beider Grundoperationen hat den Vorteil, dass das Objekt nach der anfänglichen Erosion oder Dilatation durch die anschließende Dilatation oder Erosion wieder auf die ursprüngliche Größe und an die ursprüngliche Position zurückgesetzt wird. Hierbei wird nach (SERRA 1982) nur ein Teil des Objekts wiederhergestellt. Dieser besitzt weniger Details, kann aber, wenn ein geeignetes Strukturelement verwendet wurde, als der wesentliche Teil des ursprünglichen Objekts angesehen werden. In Abbildung 3.3 ist erkennbar, dass beim Opening Elemente, die kleiner als das Strukturelement (Structure Element) sind, eliminiert werden. Beim Closing werden dagegen Lücken zwischen den Objektteilen bzw. Objekten, die kleiner sind als das Strukturelement, aufgefüllt. Ein Maßstabsraum, welcher

dem Kausalitätsprinzip genügt, wird durch die Veränderung der Größe des für gewöhnlich quadratischen oder kreisförmigen Strukturelements erreicht. Für die Anwendung mathematischer Morphologie auf Grauwertbilder sei auf (CHEN und YAN 1989), (VAN DEN BOOMGARD und SMEULDERS 1994) sowie (KÖTHER 1996) verwiesen. Bei Rasterdaten besteht für die Gebäudegeneralisierung der Nachteil, dass bei einem kreisförmigen Strukturelement ähnlich wie beim linearen Maßstabsraum Ecken abgerundet werden. Ein quadratisches Strukturelement ist hingegen nicht rotationsinvariant, so dass bei nicht horizontal bzw. vertikal ausgerichteten Strukturen Artefakte entstehen.

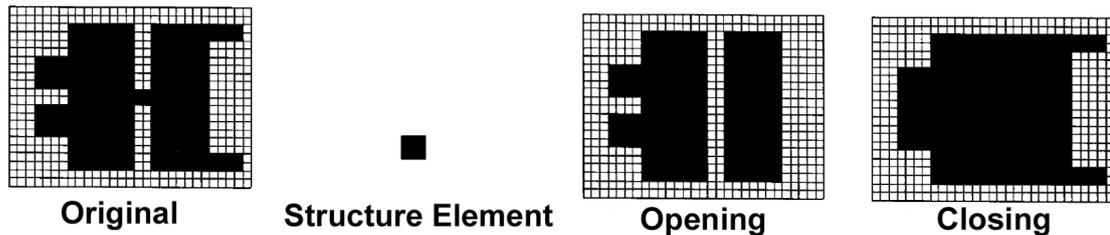


Abbildung 3.3: Opening und Closing für Binärbilder (SU et al. 1997)

3.2.3 Reaktions-Diffusionsraum

Der von KIMIA et al. (1995) eingeführte Reaktions-Diffusionsraum besteht aus einer Kombination aus linearem Maßstabsraum und mathematischer Morphologie. Er wurde unter anderem für den Formvergleich von Konturen entwickelt. Die Konturen werden inkrementell deformiert und ihr Verhalten wird über die verschiedenen Deformationsstufen studiert. Es werden zwei Arten von Deformation verwendet, welche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Bei der konstanten Deformation (hyperbolische Reaktion) werden die einzelnen Punkte einer Kontur konstant entlang der Normalen verschoben. Dies entspricht der mathematischen Morphologie und führt zu einer nichtlinearen Glättung, bei der Formsingularitäten auftreten können. Bei der krümmungsabhängigen Deformation (parabolische Diffusion) ist die Bewegung proportional zur Krümmung der Kurve am jeweiligen Punkt. Es findet in erster Näherung eine lineare Glättung statt, Singularitäten werden eliminiert. Für einen kleinen Maßstabsparameter ist dies äquivalent zum linearen Maßstabsraum.

Die Entstehung von Formsingularitäten bzw. singulären Ereignissen im Maßstabsraum ist für den Formvergleich von Konturen eine unerlässliche Eigenschaft. Diese als Schocks bezeichneten Ereignisse in Maßstabsräumen (Maßstabsraumereignisse) werden von KIMIA et al. (1995) in vier Arten unterteilt (siehe Tabelle 3.1 und Abb. 3.4). Der Schock erster Ordnung signalisiert eine Diskontinuität der Orientierung der Kontur. Ein Schock zweiter Art findet statt, wenn sich zwei Punkte einer Kontur während des Deformationsprozesses treffen, die anderen Punkte aber nicht zusammenfallen. Fallen mehrere Punkte der Kontur zu einer Linie zusammen, ist dies ein Schock dritter Art. Bei einem Schock vierter Art kollabiert die ganze Kontur zu einem Punkt.

Anhand des Auftretens von verschiedenen Arten von Schocks wird das Verhalten zweier Konturen über die Maßstäbe verglichen. Ist das Verhalten ähnlich, d.h. treten gleiche Arten von Schocks in gleichen oder nahe zusammen liegenden Maßstäben auf, so werden die Konturen ebenfalls als ähnlich angesehen.

Der Reaktions-Diffusionsraum hat aus Sicht der Generalisierung von Gebäuden den Vorteil, dass im Gegensatz zu linearem und morphologischem Maßstabsraum von der Krümmung von Kurven, d.h. von Vektordaten, ausgegangen wird. Durch die Kombination der teils komplementären Eigenschaften von mathematischer Morphologie und linearem Maßstabsraum ist der Ansatz vielseitiger als seine Komponenten. Mit den verschiedenen Arten

von Schocks ist zudem eine Grundlage für die Beschreibung und Analyse der bei der Generalisierung auftretenden Topologieänderungen, d.h. der Vereinfachung einzelner Objekte (Schock erster Art), der Aufspaltung oder Verschmelzung von Objekten oder Objektteilen (Schock zweiter Art) sowie des Dimensionsübergangs (Schock dritter und vierter Art), gelegt. Nachteilig für die Gebäudegeneralisierung ist aber, dass keine rechten Winkel beibehalten werden. In Abschnitt 4.1.2 wird die in (MAYER 1998a) vorgeschlagene Lösung für die Übertragung des Reaktions-Diffusionsraums auf rechtwinklige 2D Vektordaten vorgestellt. Diese dient der später behandelten 3D Gebäudevereinfachung als Basis.

Art des Schocks	Beschreibung	Gradient	Krümmung
Erste	Ausbuchtung (Diskontinuität des Randes)	verschwindet nicht	hohes κ
Zweite	Teile (räumlich getrennte Punkte des Randes stoßen an einem Punkt zusammen)	isoliert verschwindend	$\kappa_1 \kappa_2 < 0$
Dritte	Symmetrieachse (räumlich getrennte Punkte des Randes stoßen an mehreren Punkten zusammen)	nicht-isoliert verschwindend	$\kappa_1 \kappa_2 = 0$
Vierte	Punkt (ein Objekt fällt zu einem Punkt zusammen)	isoliert verschwindend	$\kappa_1 \kappa_2 > 0$

Tabelle 3.1: Vier Arten von Schocks ($\kappa_1 \kappa_2$: Hauptkrümmungen der Oberflächenfunktion) (MAYER 1998a)

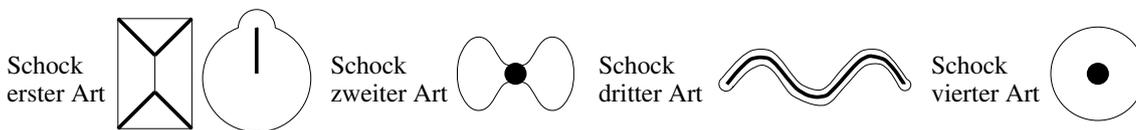


Abbildung 3.4: Verschiedene Arten von Schocks (MAYER 1998a)

4 Generalisierung von Gebäudedaten

Für die maßstäblich verkleinerte Repräsentation von Objekten der realen Welt müssen diese immer zu einem bestimmten Grad generalisiert, d.h. vereinfacht, werden, unabhängig davon, ob es sich um eine 2D oder 3D Repräsentation handelt. Zudem können mit einer einzelnen Repräsentation nicht sämtliche Charakteristika eines Objekts effizient abgedeckt werden. So würde eine Repräsentation auf Ebene der Ziegelsteine wegen der großen Detailinformation keine sinnvollen Rückschlüsse auf die Stadtteilstruktur zulassen.

Bei der Generalisierung können unterschiedliche Arten unterschieden werden. Der Detaillierungsgrad eines Datensatzes wird durch die Erfassungsgeneralisierung bestimmt. Bereits bei der Aufnahme der Daten wird das gewünschte Modell, auch in Hinblick auf den Generalisierungsgrad, berücksichtigt. Es werden nur die Messungen ausgeführt, welche entsprechend des Objektmodells nötig sind. Aus dem so entstandenen Datensatz werden weitere vereinfachte Repräsentationen durch Modellgeneralisierung und Darstellungen durch kartographische Generalisierung abgeleitet. Die Modellgeneralisierung hat laut (BELL et al. 2004) eine reine Datenreduktion zum Ziel. D.h., aus einem Datensatz werden weitere Datensätze mit geringerem Detaillierungsgrad abgeleitet. Die anschließende kartographische Generalisierung erfolgt dagegen unter Einbeziehung graphikbedingter Einschränkungen mit dem Ziel der besseren Lesbarkeit. MENG (2000) schlägt vor, die relativ objektive Modellgeneralisierung, für die eine vollautomatisierte Realisierung denkbar ist, und die relativ subjektive kartographische Generalisierung, bei der wahrscheinlich auch in Zukunft ein Rest menschlichen Eingreifens erforderlich bleiben wird, für die Automatisierung der Generalisierung getrennt zu behandeln.

Für die Umsetzung einer Generalisierung stehen verschiedene elementare Vorgänge bereit, welche nach (HÄKE et al. 2002) in Vorgänge der rein geometrischen Generalisierung und Vorgänge der geometrisch-begrifflichen Generalisierung unterteilt werden. Zu Ersteren zählen die Vorgänge Vereinfachen, Vergrößern (vor allem Verbreitern) und Verdrängen. Den Letzteren werden die Vorgänge Zusammenfassen, Auswählen bzw. Fortlassen, Klassifizieren bzw. Typisieren sowie Bewerten, z.B. in Form einer Betonung, zugeordnet.

Die für eine Generalisierung notwendigen Analysen können sich nach (RUAS 1999) auf verschiedene Ebenen eines Datensatzes, so genannte Levels, beziehen. Im Micro Level werden einzelne Objekte betrachtet, der Meso Level enthält Objektgruppen und der Macro Level umfasst den Gesamtbestand an Objekten. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem rein geometrischen Vorgang der Vereinfachung einzelner Gebäude im Rahmen einer Modellgeneralisierung. Eine kartographische Generalisierung (analog zur Kartengestaltung) wird nicht angestrebt. Die für die Generalisierung notwendigen Analysen konzentrieren sich im Wesentlichen auf den Micro Level, also auf einzelne Gebäude.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über verschiedene 2D und 3D Generalisierungsansätze mit Fokus auf der Vereinfachung von Gebäudedaten. Neben allgemeinen Ansätzen zur 2D Grundriss- und 3D Gebäudevereinfachung, werden jeweils Ansätze bzw. Ideen vorgestellt, welche auf der Maßstabsraumtheorie basieren. Diese liefern die Basis für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Generalisierungsansatz.

4.1 2D Generalisierung

In der Kartographie gibt es eine große Zahl von Ansätzen zur Generalisierung von Karten. Erfahrungen aus mehreren hundert Jahren manueller kartographischer Generalisierung führten zu Regeln und Konventionen, die auch bei einer automatischen Generalisierung von digitalen Karten Anwendung finden. Einen Überblick zu deren Entwicklung und ein Ausblick auf aktuelle Themen und Ansätze der Forschung liefern (MCMASTER und SHEA 1992), (MÜLLER et al. 1995), (MENG 1997), (MENG 2002) und (WEIBEL 2004). Ein Vergleich

verschiedener Generalisierungsverfahren wurde im Rahmen der OEEPE (European Organization for Experimental Photogrammetric Research), heute EuroSDR (European Spatial Research), durchgeführt und durch RUAS (2001) dokumentiert. Viele Generalisierungsregeln und -abläufe sind noch nicht hinreichend verstanden und formuliert, weshalb es schwierig ist, automatisch ein brauchbares Generalisierungsergebnis abzuleiten. Um dieses Problem einzugrenzen, fordern SCHÜRER und MORGENSTERN (2004) generalisierungsspezifische Datenstrukturen und Datenmodellierungen und formulieren Anforderungen an die genutzten raumbezogenen Daten, welche sich aus den verschiedenen ineinander greifenden Generalisierungsprozessen einer Modellgeneralisierung ergeben. Es existiert eine große Anzahl von Arbeiten zu den einzelnen elementaren Generalisierungsvorgängen. BURGHARDT und MEIER (1997) sowie BURGHARDT (2001) stellen z.B. ein Verfahren zur Verdrängung von Straßen mit Hilfe von so genannten Snakes vor. Die Verdrängung allgemeiner Objekte wird in (SESTER et al. 2004) behandelt. Dort wird außerdem ein Verfahren zur Typisierung für die automatische Gebäudegeneralisierung für kleine Maßstäbe mit Hilfe einer Kohonen-Merkmalsskarte vorgeschlagen.

Für die Vereinfachung gelten je nach Objekt unterschiedliche Regeln und Prozeduren. So werden linienförmige Objekte wie Straßen, unregelmäßige Polygone, welche Vegetationsgrenzen kennzeichnen, und Gebäudegrundrisse jeweils anders behandelt. Für die Linienvereinfachung wird oft der bewährte Ansatz aus (DOUGLAS und PEUCKER 1973) benutzt, der in anderen Bereichen u.a. auch als Ramer-Algorithmus bekannt ist (RAMER 1972). Für die Vereinfachung von Polygonmosaiken sei auf (BADER und WEIBEL 1997) oder (GALANDA und WEIBEL 2002) sowie (GALANDA 2003) verwiesen. Im Gegensatz zu Straßen oder unregelmäßigen Polygonen sind Gebäudegrundrisse durch rechtwinklige Strukturen dominiert, welche während der Generalisierung erhalten bleiben müssen. Für diese Arbeit bedeutende Ansätze zur Grundrissvereinfachung werden im Folgenden vorgestellt.

4.1.1 Vereinfachung von 2D Gebäudegrundrissen

Ein Ansatz, der vielen automatischen Prozeduren zur Generalisierung von Gebäudegrundrissen zugrunde liegt oder sie inspiriert hat, stammt von STAUFENBIEL (1973). Er formuliert ein komplexes Regelwerk für die Vereinfachung lokaler Strukturen von Gebäudegrundrissen. Zunächst wird von einem einzelstehenden Gebäude mit nur einer kurzen zu eliminierenden Kante ausgegangen, welches nur rechte oder gestreckte Winkel aufweist. Abhängig von der Differenz der Richtungswinkel zwischen der Vorgänger- und Nachfolgerkante der kurzen Kante wird in verschiedene Strukturen und daraus resultierend in verschiedene Fälle für die Generalisierung unterschieden. Die Regeln werden schrittweise auf komplexere Ausgangsmodelle wie schiefwinklige Gebäude, Gebäude mit mehreren aufeinander folgenden kurzen Seiten und schließlich auf die Gebäudeverbände geschlossener Bebauung erweitert. Im Weiteren werden die Arbeiten in der Reihenfolge dargestellt, die sich aus der Ähnlichkeit ihrer Vorgehensweise mit der von STAUFENBIEL (1973) ergibt.

In (REGNAULD et al. 1999) werden in einem iterativen Prozess Kanten, deren Längen unter einem festgelegten Schwellwert liegen, eliminiert und die benachbarten Kanten anschließend durch Verlängerung oder Projektion verbunden. Kleine Vorsprünge oder Treppenstrukturen, die durch die Verschneidung entstehen können, werden ermittelt und beseitigt.

(VAN KREVELD 2001) beschreibt ein Verfahren für die schrittweise Generalisierung von Karten. Die Vereinfachung von Gebäudegrundrissen erfolgt, wie in Abbildung 4.1 veranschaulicht, durch die Bewegung von Kanten. Einzelne Kanten werden in oder entgegen der Richtung ihrer Normalen bewegt, wodurch benachbarte Kanten verkürzt oder verlängert werden, bis die Knotenanzahl des Gebäudes reduziert ist.

STILLA et al. (1998) nutzen ein Produktionsnetz zur Vereinfachung von relativ einfachen Gebäudegrundrissen aus verschiedenen Datenquellen mit dem Ziel, Informationen aus diesen vergleichen und kombinieren zu können.

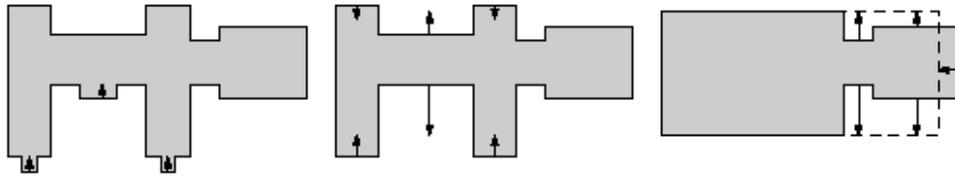


Abbildung 4.1: Schrittweise Vereinfachung durch Bewegung von Kanten (VAN KREVELD 2001)

In dem Produktionsnetz wird eine Teilehierarchie beschrieben, mittels derer Vorsprünge und Einbuchtungen erkannt und eliminiert werden können.

MEYER (1989) klassifiziert Gebäude in Rechtecke, L-, T-, U- und Z-Formen. Dazu werden die gerasterten Gebäudegrundrisse mit Vorlagen (Templates) korreliert. Kann ein Gebäude auf diese Weise nicht klassifiziert und damit generalisiert werden, wird der Ansatz von STAUFENBIEL (1973) angewandt. POWITZ (1993) erweitert (MEYER 1989) um die Berücksichtigung von Straßen und um die kartographische Verdrängung.

Für die Grundrissvereinfachung werden also oft lokal die Relationen zwischen benachbarten Kanten analysiert und verändert. In einigen Ansätzen findet aber auch eine globale Anpassung des gesamten Gebäudes an ein Template statt. Für beide Vorgehensweisen wird im Folgenden jeweils ein repräsentativer Ansatz detailliert beschrieben.

Der Ansatz von SESTER (2001) nutzt ähnliche Regeln wie (STAUFENBIEL 1973). Allerdings sind diese Regeln weniger komplex, da nur eine Näherungslösung abgeleitet wird, welche dann über eine Ausgleichung verbessert wird. Die genäherte Generalisierung wird durch Eliminieren und Ersetzen von Gebäudeseiten erreicht, deren Länge unter einem Schwellwert liegt. Für freistehende Gebäude können für jede kurze gerichtete Kante s_n abhängig von den Richtungen ihrer Vorgänger- und Nachfolgerkanten (s_{n-1}, s_{n+1}) drei verschiedene Fälle auftreten (siehe Abb. 4.2).

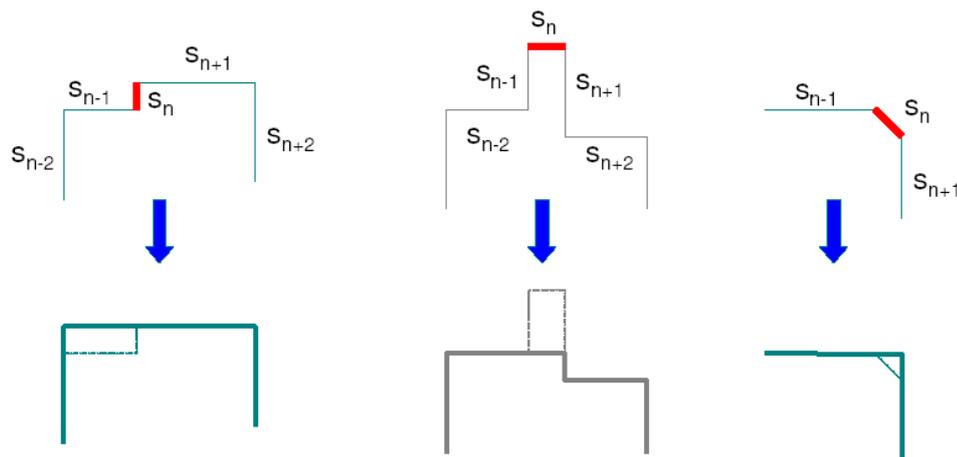


Abbildung 4.2: Elimination zu kurzer Kanten s_n : Versatz (links), Ausbuchtung (Mitte) und Ecke (rechts). Zu kurze Kanten sind fett dargestellt (SESTER 2001).

Haben s_{n-1} und s_{n+1} die gleiche Richtung, handelt es sich um einen Versatz. Die längere der beiden Nachbarkanten wird verlängert und mit der entsprechenden Folgekante verschritten. Haben s_{n-1} und s_{n+1} unterschiedliche Richtungen, ist es eine Ein- oder Ausbuchtung. Hier wird z.B. für den Fall, dass s_{n+1} länger als s_{n-1} ist, die

Kante s_{n-2} mit der Kante s_{n+1} verschritten. Bilden Vorgänger- und Nachfolgerkante (ungefähr) einen rechten Winkel (Ecke), werden beide verschritten und die Kante s_n entfällt. Das so genäherte Modell wird in einem Ausgleichungsprozess an den ursprünglichen Grundriss angepasst.

Die Ausgleichung geht von einem parametrischen Modell aus, bei dem das Gebäude als Funktion von Breiten- und Längenwerten in den Hauptrichtungen des Gebäudes beschrieben wird. Dies hat den Vorteil, dass für Kanten, welche im ursprünglichen Gebäude nur genähert rechtwinklig sind, im ausgeglichenen Modell implizit Rechtwinkligkeit forciert werden kann (siehe Abb. 4.3). Garantiert werden kann die Rechtwinkligkeit allerdings nur, wenn nicht mehr als zwei (rechtwinklige) Gebäudehauptrichtungen existieren.

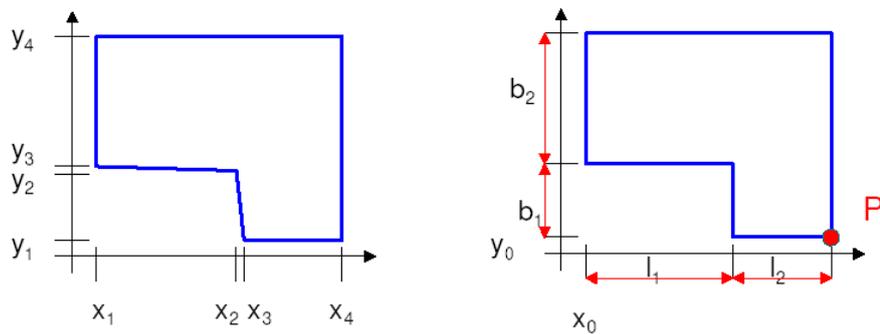


Abbildung 4.3: Implizite Rechtwinkligkeit durch Hauptachsen des Gebäudes parallel zu den Koordinatenachsen (SESTER 2001)

Die Gebäudeparameter sind die zu optimierenden Unbekannten, und die ursprünglichen Gebäudeseiten sind die Beobachtungen, welche als Funktion der unbekannteten Gebäudeparameter formuliert werden. Das stochastische Modell bestimmt die Genauigkeit und Variationsmöglichkeit einer Kante. Der Ansatz ermöglicht es, weitere Größen, wie z.B. die Gebäudegrundfläche, im Ausgleichungsprozess zu bestimmen bzw. festzuhalten. Für die Zusammenfassung von Gebäuden wird die Nutzung der morphologischen Operationen Dilatation und Erosion (siehe Abschnitt 3.2.2) vorgeschlagen.

Ähnlich wie (MEYER 1989) nutzen RAINSFORD und MACKANESS (2002) Muster-Zuordnungs-Algorithmen (Template Matching), um aus einem Satz von Templates den Gebäudegrundriss auszuwählen, der die Form eines (ländlichen) Gebäudes am besten charakterisiert. Als Templates stehen neun verschiedene Formen zur Verfügung, welche nach den Buchstaben benannt sind, denen sie ähneln (siehe Abb. 4.4).

IFPELUOT

Abbildung 4.4: Vorlagen für das Template Matching (I, F, P, G, E, L, U, O, T) (RAINSFORD und MACKANESS 2002)

Die Zuordnung erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden Abweichungen vom rechten Winkel beseitigt und sehr kleine Strukturen entfernt. Dann wird ermittelt, ob der Grundriss aus ein oder zwei geschlossenen Begrenzungs-polygonen besteht. Existieren zwei Polygone, handelt es sich um ein Gebäude mit einem Innenhof, welches durch ein O oder ein P beschrieben werden kann. Bei nur einem Polygon kann es sich aus Sicht des Ansatzes um eine I-, F-, G-, E-, L-, U- oder T-Form handeln. Nach dieser groben Vorauswahl werden die Winkel innerhalb der Polygone untersucht. Es wird in 90°- und 270°-Winkel unterschieden. Je nach Kombination der

Winkel wird die passende Vorlage mit gleicher Winkel-Sequenz ausgewählt. Die Vorlage wird schließlich wenn möglich durch Dehnen, Stauchen, Verschieben und Rotieren an die Geometrie des Gebäudes angepasst (siehe Abb. 4.5).

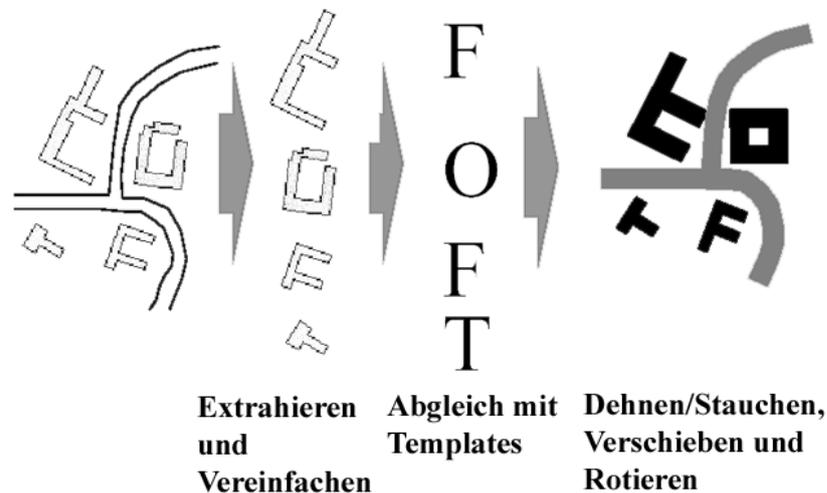


Abbildung 4.5: Prozess zur Generalisierung ländlicher Gebäude mit Hilfe von Template Matching (RAINSFORD und MACKANESS 2002)

4.1.2 Maßstabsräume zur 2D Generalisierung

Verschiedene Arbeiten zeigen, dass die in Kapitel 3 zusammengefassten Erkenntnisse der Maßstabsraumtheorie zur 2D Generalisierung genutzt werden können. So verwenden z.B. LI (1996), SU et al. (1997) und CÁMARA und LÓPEZ (2000) mathematische Morphologie für die Generalisierung von Rasterdaten. Bei Ersterem werden Opening und Closing mit einfachen Strukturelementen auf glatte Konturen angewendet. Der Fokus der anderen beiden Arbeiten liegt dagegen auf der Generalisierung von Gebäudegrundrissen mit Diskontinuitäten in Form von (rechten) Winkeln. Speziell nutzen SU et al. (1997) mathematische Morphologie zur Zusammenfassung flächenhafter Objekte, gefolgt von einer Vereinfachung der entstandenen Kontur. CÁMARA und LÓPEZ (2000) vergleichen die Ergebnisse der automatischen Zusammenfassung von Flächen durch verschiedene Kombinationen von Erosion, Dilatation und unterschiedlichen Strukturelementen mit den Ergebnissen der manuellen Generalisierung.

Eine wichtige Basis für den in dieser Arbeit entwickelten Ansatz zur Generalisierung von 3D Gebäudedaten stellt der Ansatz von MAYER (1998b) dar, welcher die hauptsächlich rasterbasierten Verfahren auf den Vektorraum erweitert. Er schlägt vor, aufgrund der besonderen Struktur von Gebäudedaten, speziell der meist orthogonal angeordneten, geraden Kanten, die Maßstabsraumoperationen für Vektordaten durch Verschiebung der Kanten in oder gegen die Richtung ihrer Normalen zu realisieren. Dies entspricht dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Reaktions-Diffusionsraum. Beim Reaktionsteil wird (implizit) ein quadratisches Strukturelement verwendet, das parallel zur jeweiligen Seite ausgerichtet ist. Für die Dilatation werden alle Kanten gleich weit nach außen und für die Erosion nach innen verschoben. Um rechte Winkel beizubehalten, werden die Kanten anschließend neu verschnitten. Abbildung 4.6 zeigt, wie durch Erosion der Vektordarstellung einer Gebäudekontur das Verbindungsstück zwischen den zwei Gebäudeteilen wegfällt und somit das Gebäude in zwei Teile gespalten wird. Durch eine anschließende Dilatation werden die Teile wieder zu einem Objekt aggregiert.

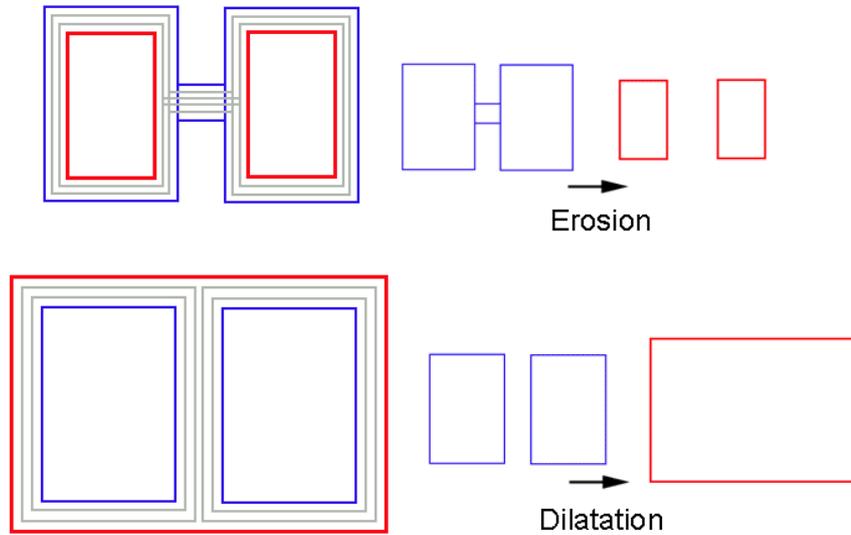


Abbildung 4.6: Aufspaltung bei Erosion (oben) und Verschmelzung bei Dilatation für 2D-Vektordaten (unten): blau – Ausgangsobjekt, grau – inkrementelle Schritte, rot – resultierendes Objekt

Der Diffusionsteil glättet die Konturen in Abhängigkeit von ihrer Krümmung. Diese Komponente wird in (MAYER 1998b) als Krümmungsraum bezeichnet. Im Gegensatz zur mathematischen Morphologie werden für den Krümmungsraum nur ausgewählte Kanten mit kleinem Krümmungsradius bewegt. Dieser korrespondiert hierbei für „regionale“ Strukturen mit der halben Länge einer Kante (siehe Abb. 4.7). Eine starke Krümmung wird demnach durch kurze Kanten charakterisiert. Kanten werden nur dann bewegt, wenn ihre Länge unter einem vorgegebenen Schwellwert liegt. Alle anderen Kanten werden nicht verändert. Der diskrete Schwellwert ist der Grund, weshalb der so entstandene Krümmungsraum als diskret bezeichnet wird.

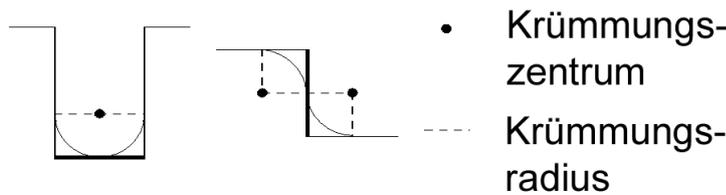


Abbildung 4.7: Diskreter Krümmungsraum – Krümmungsradius (MAYER 1998b)

MAYER (1998b) unterscheidet U-, Z- und L-Strukturen (siehe Abb. 4.8). Abhängig von der Struktur wird unterschiedlich vorgegangen, um die auftretenden Maßstabsraumereignisse zu handhaben und damit eine Vereinfachung herbeizuführen. Für U-Strukturen werden kleine nach außen oder innen zeigende Strukturen eliminiert, indem die kurze Kante so verschoben wird, dass sie mit der übergeordneten Struktur verschmilzt. Für Z-Strukturen findet ein Ausgleich der beiden langen Kanten statt. D.h., die Kanten werden gegenläufig bewegt, bis sie aufeinander treffen. Bei der L-Struktur werden die zwei oder mehr kurzen Kanten gleichzeitig nach innen oder außen verschoben, bis sie in einem Punkt verschmelzen.

MAYER (1998b) klassifiziert die Maßstabsraumereignisse für Vektordarstellungen in Auslöschung, Verschmelzung, Spaltung und Erzeugung. Entsprechend der Unterteilung aus Abschnitt 3.2.3 wäre die in Abbildung 4.6 gezeigte Spaltung ein Beispiel für einen Schock zweiter Art. Außerdem wird in interne und externe Ereignisse

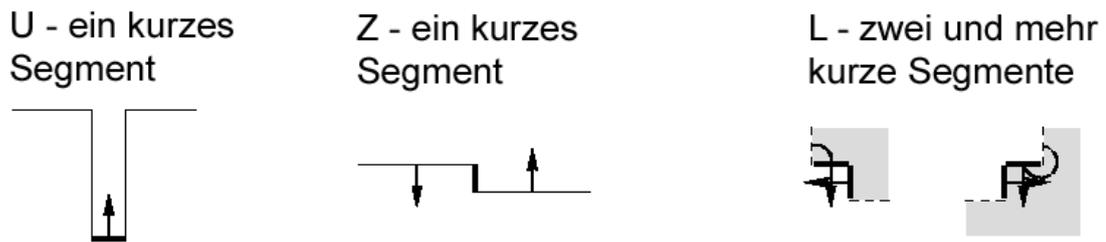


Abbildung 4.8: Strukturen des diskreten Krümmungsraums (MAYER 1998b)

unterschieden (siehe Abb. 4.9). Bei internen Ereignissen sind nur topologisch benachbarte Kanten betroffen. Bei externen Ereignissen berühren oder überlappen sich topologisch nicht benachbarte Objektteile eines oder mehrerer Objekte.

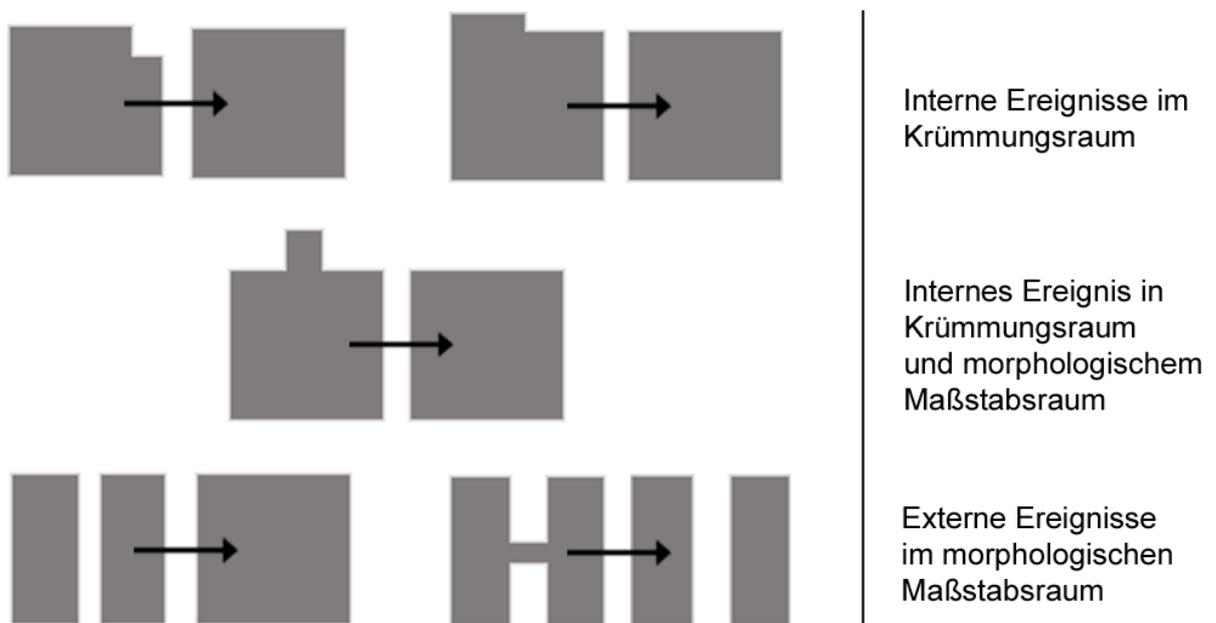


Abbildung 4.9: Interne und externe Maßstabsraumereignisse

Externe Ereignisse, wie z.B. die Aufspaltung eines Objekts in zwei Objektteile oder die Zusammenfassung zweier Objektteile, entstehen nur durch Anwendung mathematischer Morphologie. Die Operationen des Krümmungsraums verursachen dagegen nur interne Ereignisse. Z- und L-Strukturen können nur durch Methoden des Krümmungsraums, nicht aber durch Erosion und Dilatation vereinfacht werden. Lediglich U-Strukturen können durch mathematische Morphologie und Krümmungsraum gleichermaßen eliminiert werden. Mathematische Morphologie und Krümmungsraum ergänzen sich also und werden daher für die meist orthogonalen Vektordaten von Gebäuden nacheinander angewandt.

4.2 3D Generalisierung

Da kartenverwandte Darstellungen in 3D oft eine sehr aufwändige Entsprechung in Form von Modellen, z.B. aus Holz, besitzen, gibt es keine Literatur zur analogen 3D Generalisierung. Für die Vereinfachung von digitalen 3D Modellen liegt der Fokus im Bereich der Geoinformationssysteme (GIS) bisher auf der Vereinfachung von Geländemodellen und im Bereich der Computer Graphik auf komplexen allgemeinen Objekten. In beiden Fällen werden die Objekte meist durch Dreiecksnetze beschrieben und zeichnen sich im Gegensatz zu Gebäuden oft durch glatte Oberflächen mit sanften Übergängen und dadurch durch eine sehr hohe Anzahl von Polygonen aus. Die Generalisierung von Relief bzw. digitalen Geländemodellen ist z.B. in (WEIBEL 1989) und (HATGER und KREMEIKE 2003) dargestellt. Beispiele für die Polygonreduzierung allgemeiner 3D Objekte aus der Computer Graphik sind der auf ϵ -Offset Oberflächen basierende Ansatz von VARSHNEY et al. (1995) oder das LODestarsystem von SCHMALSTIEG (1996), mit welchem auf Basis von Octree Quantisierung automatisch LODs generiert werden. Der von GARLAND und HECKBERT (1997) entwickelte Ansatz zur Oberflächenvereinfachung basierend auf der „Quadric Error Metric“ wurde von COORS (2001) so erweitert, dass wichtige Merkmale bei der Vereinfachung erhalten bleiben. Weitere neuere Arbeiten zur Netzvereinfachung sind (POPOVIĆ und HOPPE 1997), (ROSSIGNAC 2001) und (VELHO 2001). Eine umfassende Zusammenfassung und Bewertung verschiedener Verfahren ist in (HECKBERT und GARLAND 1997) zu finden. Für die Generalisierung von Gebäuden, d.h. Objekten, die durch einen hohen Anteil von rechtwinkligen Strukturen gekennzeichnet sind, ist die Erhaltung der Rechtwinkligkeit essenziell. Dies führt zu speziellen Anforderungen an das Generalisierungsverfahren, die über eine allgemeine Polygonreduzierung hinausgehen. Im folgenden Abschnitt werden daher zwei Ansätze vorgestellt, bei denen eine 3D Modellgeneralisierung erfolgt, welche die rechtwinklige Struktur der Objekte berücksichtigt.

4.2.1 Vereinfachung von 3D Gebäudedaten

Für die Generalisierung von 3D Gebäuden schlägt THIEMANN (2003) vor, das CSG-Modell (siehe Abschnitt 2.1.1) eines Objekts, d.h. Gebäudes, in seine einzelnen 3D Primitive (Hauptkörper und Details) aufzuspalten. Kleine Primitive werden im Generalisierungsprozess eliminiert. Hierdurch soll eine kontinuierlich skalierbare Repräsentation erhalten werden. Statt verschiedene Modelle für die einzelnen Maßstäbe zu speichern, wird nur die Veränderung gespeichert, die ein Objekt bei der Vereinfachung erfährt. Für die Generierung des Volumenmodells durch eine Segmentierung in verschiedene Primitive werden zwei Verfahren diskutiert. Zum einen ist dies die Einpassung von 3D Primitiven in die einzelnen Bestandteile des Objekts, zum anderen eine von RIBELLES et al. (2001) beschriebene Segmentierungsmethode, welche für die Anwendung im Bereich der Computer Aided Design (CAD) Modelle entwickelt wurde.

Bei Letzterer werden die 3D Primitive separiert, indem das als Randmodell vorliegende Objekt mit einer oder mehreren Ebenen seiner Oberfläche geschnitten wird. Die Dreiecke, aus denen das Objekt besteht, werden so neu vermascht, dass jedes Dreieck entweder auf (ON) der jeweiligen Schnittebene bzw. innerhalb (IN) oder außerhalb (OUT) des durch die jeweilige Schnittebene abgetrennten Bereichs des Raums liegt. Somit kann jedes Dreieck bezüglich der Lage zu der jeweiligen Schnittebene klassifiziert werden. Benachbarte, gleich klassifizierte Dreiecke werden in einem Cluster-Graphen zusammengefasst. Das grundlegende Prinzip ist in Abbildung 4.10 anhand eines 2D Objekts erläutert. Die Dreiecke des 3D Objekts entsprechen den Kanten in 2D.

Wenn die Elemente eines Clusters für keine der Ebenen als ON klassifiziert sind, werden sie als mögliches zu extrahierendes Primitiv ausgewählt und vom restlichen Objekt separiert. Auf Grundlage der „Quadric Error Metric“ wird versucht, die durch die Abspaltung entstandenen Löcher zu füllen, um aus dem Grundkörper und dem extrahierten Primitiv geschlossene Körper abzuleiten. Ist der Versuch erfolgreich, wird das Primitiv als gültige Hypothese angesehen. Bei (RIBELLES et al. 2001) werden auf diese Art verschiedene Kombinationen

von Schnittebenen untersucht, redundante Hypothesen für Primitive werden ausgewählt, anhand der Testgröße Quotient aus Schnittfläche und gesamter Oberfläche des Merkmals bewertet und zuletzt das am besten bewertete Primitiv ausgewählt. Für gewöhnlich ist das größere Objekt der Grundkörper und das kleinere das zu extrahierende Primitiv.

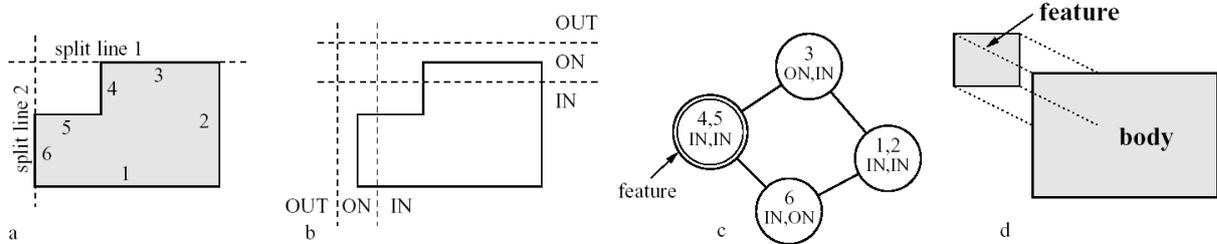


Abbildung 4.10: Generierung separater Primitive in 2D: Kleines rechteckiges Objekt wird von größerem subtrahiert. a) Gegebenes Objekt, b) zwei Schnittebenen und Klassifizierung, c) Cluster Graph zeigt geclusterte Kanten mit jeweiliger Klassenbezeichnung, d) Zwei Primitive (feature und body) auseinander gezogen (RIBELLES et al. 2001)

In (THIEMANN und SESTER 2004) wurde die Segmentierung nach (RIBELLES et al. 2001) umgesetzt. Es wird diskutiert, wie nach der Segmentierung eine Bewertung der Signifikanz der einzelnen Primitive für feste Maßstäbe bzw. Auflösungen sowie eine Zuordnung der Primitive zu bestimmten semantischen Einheiten, wie z.B. Balkon oder Schornstein, erfolgen kann. Hierfür werden zahlreiche geometrische und topologische Attribute, Relationen zu anderen Objektteilen sowie Vergleiche mit üblichen Werten, z.B. mit der typischen Höhe von Stockwerken, herangezogen. Durch Verwendung des Ansatzes von RIBELLES et al. (2001) kann das Verfahren kleine Gebäudeteile, wie z.B. Schornsteine, Balkone oder Dachgauben eliminieren und konkave Strukturen auffüllen. Ein Volumenausgleich findet aber nicht statt.

KADA (2002a) nutzt zur 3D Generalisierung eine Kleinste Quadrate Ausgleichung und überträgt damit die Idee aus (SESTER 2001) (siehe Abschnitt 4.1.1) in 3D. Als Gebäudemodell wird eine Randdarstellung mit den Eigenschaften eines mannigfaltigen Festkörpers (siehe Abschnitt 2.1.2) angenommen. Die Generalisierung erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden für das Gebäudemodell Zwangsbedingungen und eine für sie geltende Hierarchie festgelegt. Diese Bedingungen dienen der Erhaltung der Symmetrie und umfassen z.B. Koplanarität, Parallelität und Rechtwinkligkeit. Im nächsten Schritt erfolgt eine iterative Vereinfachung, d.h. eine Erkennung von Strukturen und Signifikanzberechnung, gefolgt von der Elimination der Strukturen mit geringer Wichtigkeit. Bei der Erkennung der Strukturen wird zwischen den Typen Ausbuchtung, Kerbe und Spitze unterschieden (siehe Abb. 4.11).

Für die Modifikation des Objekts bzw. die Elimination der Strukturen stehen je nach Typ unterschiedliche Operationen (siehe Abschnitt 2.1.2, eulersche Operationen) zur Verfügung (KADA 2003). Eine Ausbuchtung wird beispielsweise durch eine Kombination aus Edge Collapse und Kantenverkürzung (siehe Abb. 4.12) eliminiert. Anschließend wird eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten ausgeführt, um für die Knoten der verbleibenden Flächen neue Positionen zu finden, welche den Zwangsbedingungen genügen. Dabei wird eine möglichst geringe Abweichung des generalisierten Modells vom originalen Modell angestrebt.

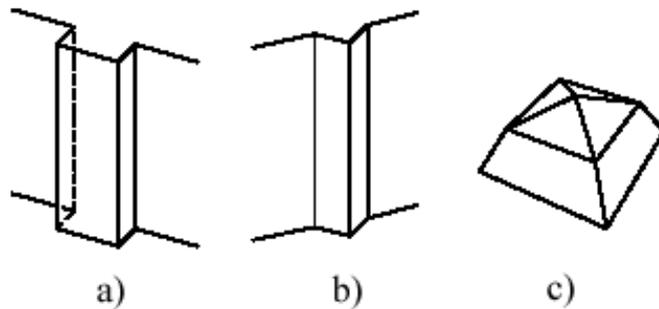


Abbildung 4.11: Die Extraktion der Strukturen unterscheidet zwischen flächen-, kanten- und knotenbasierten Strukturen: a) Ausbuchtung, b) Kerbe und c) Spitze (KADA 2002a)

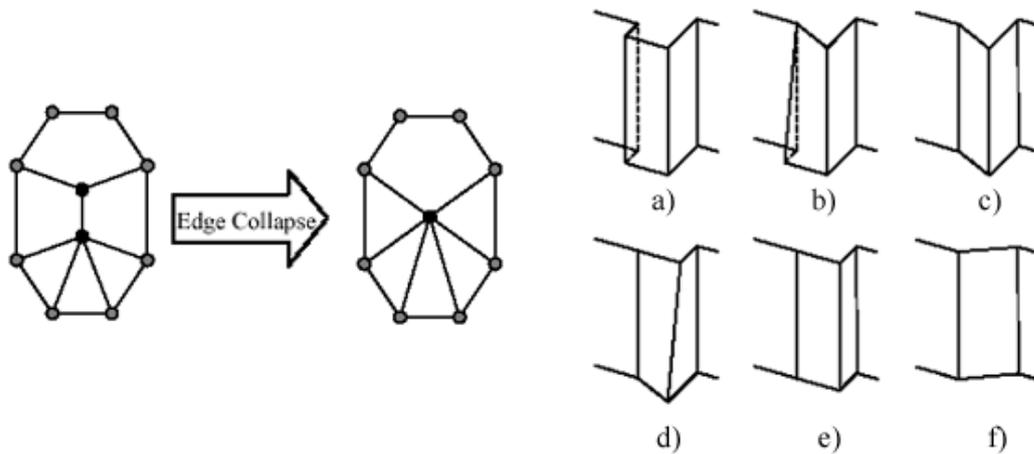


Abbildung 4.12: Links: Bei der Edge Collapse Operation werden die Endpunkte der zentralen Kante zu einem Punkt zusammengeführt. Rechts: a) - e) Entfernung einer Ausbuchtung: b) und c) Die Endpunkte der kurzen Kanten werden mittels Edge Collapse Operation zu einem Punkt zusammengeführt. d) und e) Die längeren Kanten werden um die Länge der beseitigten kurzen Kante verkürzt. f) Die Anwendung von Edge Collapse Operationen auf alle Kanten würde zuviel Geometrie entfernen und zu einer ungewünschten geeigten Ebene führen (KADA 2002b). Die koplanaren Flächen in e) können durch zwei Edge Collapse Operationen vereinigt werden (hier nicht dargestellt).

4.2.2 Maßstabsräume zur 3D Generalisierung

In Abschnitt 4.1.2 wurde gezeigt, wie für 2D Vektordaten von Gebäuden die Maßstabsräume mathematische Morphologie und Krümmungsraum realisiert werden können, indem die Kanten in oder gegen die Richtung ihrer Normalen verschoben und anschließend wieder verschritten werden. Für die mathematische Morphologie erfolgt die Verschiebung gleichmäßig für alle Kanten und für den Krümmungsraum abhängig von der Krümmung regionaler 2D Strukturen. Für die Generalisierung von 3D Gebäuden in Form von Polyedern erweitert MAYER (1998b) das Verfahren, indem er statt der 2D Kanten 3D Flächen verschiebt. Dabei werden für die mathematische Morphologie alle Flächen gleichermaßen in oder entgegen der Richtung ihrer Normalen bewegt. Erfolgt die Bewegung nach innen, handelt es sich um eine Erosion, erfolgt sie nach außen, entspricht dies einer Dilatation. Für den Krümmungsraum ist die Richtung und Weite der Flächenbewegung abhängig von der Krümmung regionaler 3D Strukturen.

Während die mathematische Morphologie in 3D relativ einfach zu realisieren ist, ist die Konzeption und Umsetzung des Krümmungsraums vergleichsweise kompliziert. Auswahl und Bewegungsrichtung der Flächen sind abhängig von der Relation der Flächennormalen zueinander. Diese sind, wie in Abbildung 4.13 veranschaulicht, für orthogonale Gebäude aus den 2D Polygonen der benachbarten Flächen ableitbar.



Abbildung 4.13: a) Normalen einer Treppenstruktur in 3D hängen vom b) 2D Polygon der benachbarten Fläche ab (MAYER 1998b).

Die dort gezeigte Treppenstruktur wird über die konkaven Kanten des Polygons erkannt. Konkave Kanten können wiederum durch den Vergleich der Orientierung von drei aufeinanderfolgenden Punkten mit der Orientierung des Polygons identifiziert werden (siehe Abb. 4.14).

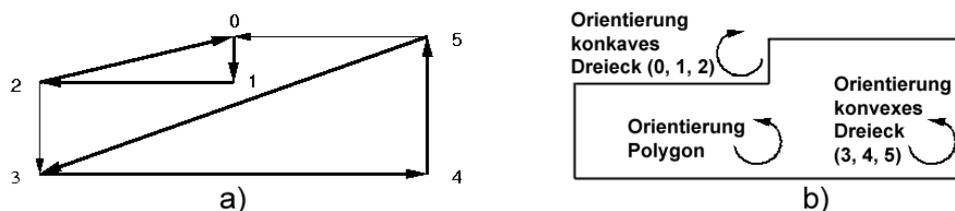


Abbildung 4.14: Bestimmung konkaver Kanten - Die Orientierung von dem Dreieck in a), welches durch die Punkte 0,1,2 gebildet wird und zwei konkave Kanten definiert, ist, wie in b) zu sehen ist, im Uhrzeigersinn. Das Dreieck 3,4,5 mit zwei konvexen Kanten ist dagegen gegen den Uhrzeigersinn orientiert, besitzt also die gleiche Orientierung wie das gesamte Polygon (MAYER 1998b).

Weicht die Orientierung des von drei Punkten aufgespannten Dreiecks von der Orientierung des restlichen Polygons ab, sind die zwei zwischen ihnen liegenden Kanten konkav. Die Schwierigkeit bei diesem Ansatz liegt in der Bestimmung der Bewegungsrichtung der einzelnen Flächen aufgrund der vielfältigen Relationen der Flächen zueinander. Dies ist besonders für komplexe, verschachtelte Gebäude ein Problem.

Werden nur auf Grundlage eines Schwellwertes für den Abstand von Flächen ausgewählte Flächen bewegt und die restlichen Flächen bleiben unbeeinflusst, wird der so erhaltene Krümmungsraum als diskret bezeichnet. Ein kontinuierlicher Krümmungsraum wird laut (MAYER 1998b) durch die Gewichtung der Flächenbewegung mit dem Flächeninhalt ermöglicht. Es werden alle Flächen bewegt, allerdings mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Zur Kontrolle der Bewegung wird eine Gewichtungsfunktion gewählt, welche proportional zur Länge der konkaven Kanten ist und die Bewegung erfolgt abhängig von den in Abbildung 4.15 dargestellten drei unterschiedlichen grundlegenden Strukturen. Die Unterschiede zwischen diskretem und kontinuierlichem Krümmungsraum sind in Tabelle 4.1 gegenübergestellt. Mathematische Morphologie und Krümmungsraumoperationen werden in (MAYER 1998b) iterativ und in kleinen inkrementellen Schritten angewandt.

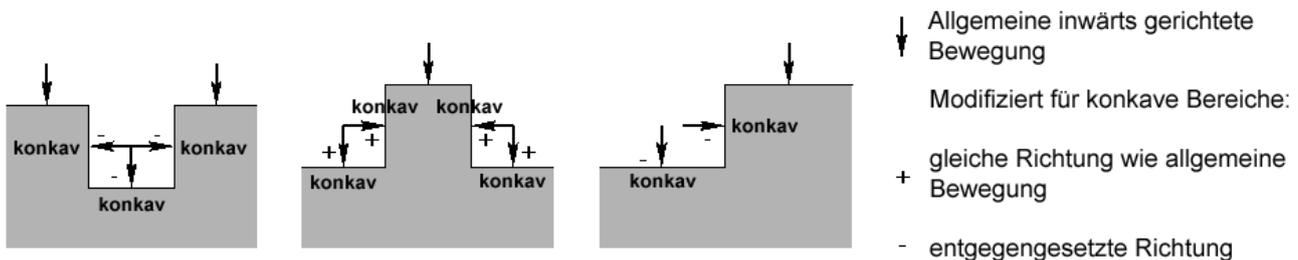


Abbildung 4.15: Bewegung der Flächen im kontinuierlichen Krümmungsraum für die drei grundlegenden Strukturen (MAYER 1998b)

	Diskreter Krümmungsraum	Kontinuierlicher Krümmungsraum
Allgemeingültigkeit	abhängig von Schwellwert	allgemeingültig
Bewegung	konvexe Flächen werden festgehalten	Alle Flächen werden bewegt, aber mit unterschiedlicher Geschwindigkeit
Gewichtung	Flächeninhalt	Länge der konkaven Kanten und Flächeninhalt (z.B. Länge ² * Flächeninhalt)

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung diskreter - kontinuierlicher Krümmungsraum (MAYER 1998b)

Die von MAYER (1998b) entwickelten Ideen legen den Grundstein für den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatz. In Kapitel 5 wird beschrieben, wie mathematische Morphologie mit den Funktionen des 3D ACIS Modelers umgesetzt wird, wie der Krümmungsraum alternativ abgeleitet werden kann und wie aus beiden Operationen ein neuer Ansatz entsteht, mit dem in nur einem, integrierten Vorgehen alle rechtwinkligen bzw. parallelen Strukturen vereinfacht werden können.

4.2.3 Orthogonalisierung als Maßstabsraum

Die von MAYER (1998b) entwickelten Methoden zur Generalisierung und auch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Weiterführungen dieser Ideen, gehen von weitgehend rechtwinkligen Gebäudestrukturen aus. Gebäude können aber vor allem im Bereich der Dächer auch nicht orthogonale Strukturen aufweisen. Kleine Abweichungen vom rechten Winkel, bedingt z.B. durch die Datenerfassung, sollten eliminiert werden, damit der Generalisierungsprozess optimal funktioniert. Deutlich abweichende Strukturen werden beibehalten, da sie für die Charakteristik des Gebäudes wichtig sind. In einem mittleren Maßstab bzw. Abstand zum Betrachter können

z.B. kleine Dachstrukturen wie Dachgauben eliminiert werden. Ist das Objekt nur noch vage am Horizont erkennbar, werden auch die grundlegenden Dachformen überflüssig. Je nach Maßstab und Größe der betroffenen Gebäudeteile sind daher auch solche Strukturen zu orthogonalisieren. Unter Orthogonalisierung wird im Folgenden verstanden, dass bei der automatischen, maßstabsabhängigen Generalisierung von 3D Gebäudedaten rechtwinklige Strukturen erzwungen werden. Genauso wie das Wegfallen kleiner Gebäudeteile, die Spaltung eines Gebäudes in zwei Teile oder die Verschmelzung zweier Gebäudeteile, kann auch das Wegfallen nicht orthogonaler Strukturen, z.B. geneigter Dachstrukturen, als erwünschtes Maßstabsraumereignis angesehen werden.

MAYER (1998b) schlägt daher basierend auf dem von ihm genutzten inkrementellen Prozess zur Generalisierung mit morphologischen Operationen und Krümmungsraumoperationen eine ebenfalls schrittweise Orthogonalisierungsprozedur vor. Hierbei definieren die Schritte den Maßstabsparameter des Maßstabsraums. Die Prozedur nutzt für 2D Gebäudegrundrisse den Thaleskreis (siehe Abb. 4.16). Weicht der Winkel zwischen den in Punkt P_i zusammentreffenden Kanten von einer rechtwinkligen Struktur ab, wird zwischen dem vorhergehenden Punkt P_{i-1} und dem nachfolgenden Punkt P_{i+1} eine Verbindungslinie gebildet. In ihrer Mitte liegt der Punkt P_M . Der Punkt P_i wird nun so auf P_M zu oder von P_M wegbewegt, dass sich die zwischen beiden Punkten liegende Entfernung $\overline{P_{i-1}P_{i+1}}/2$, also dem Thaleskreisradius, annähert.

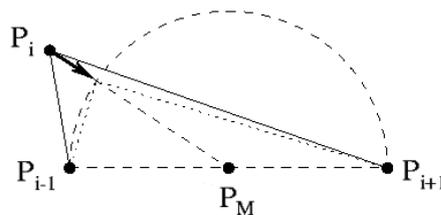


Abbildung 4.16: Orthogonalisierung der Winkel mit Hilfe des Thales-Kreises (MAYER 1998b)

Diese Prozedur wird inkrementell so lange auf alle Winkel im Polygon angewendet, bis alle Winkel rechtwinklig sind. Dabei kann das Objekt seine Lage verändern. Dieses Defizit wird durch eine Translation zurück in den ursprünglichen Schwerpunkt beseitigt. Das Problem, dass die Bewegungswinkel bei nicht orthogonalen Strukturen nicht unabhängig voneinander sind und deshalb nicht korrekt aufsummiert werden können, wird, wie Abbildung 4.17 zeigt, durch die Verschneidung paralleler Kanten gelöst.

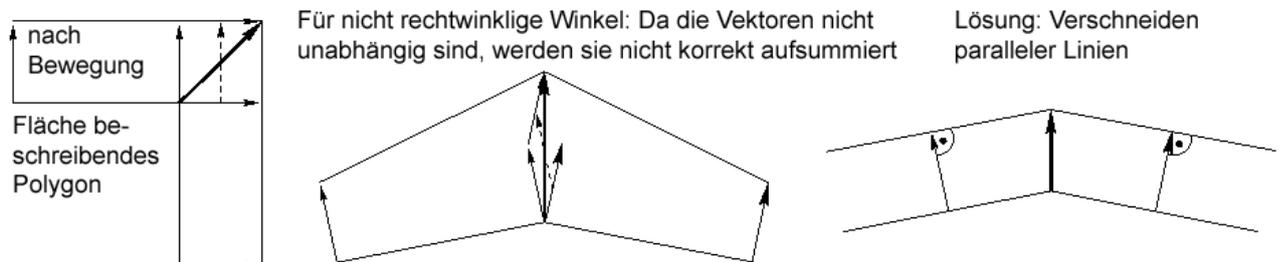


Abbildung 4.17: Für nicht rechtwinklige Strukturen (Mitte) summieren sich die Bewegungsvektoren nicht korrekt auf (MAYER 1998b)

Für 3D Gebäude schlägt MAYER (1998b) eine ähnliche Vorgehensweise vor. Problematisch ist dabei, dass die Flächen im 3D Raum voneinander abhängen. Wird ein 3D Winkel verändert, ändern sich auch die anderen

Winkel. Sind gegenüberliegende Flächen nicht symmetrisch, werden die Knoten wegen unterschiedlicher Dreiecksseiten des Thaleskreises unterschiedlich bewegt, das Gebäude wird geschert. Um dies zu vermeiden, werden die Knoten in Richtung der Winkelhalbierenden der umgebenden Seiten bewegt, da dies unabhängig von der Länge ist. Um die Position eines bewegten Knotens zu bestimmen, werden die Ebenen verschnitten.

Aufgrund der zu lokalen Behandlung nicht orthogonaler Winkel und der daraus resultierenden Scherung des Gebäudes im Allgemeinfeld wurde dieses Verfahren von MAYER (1998b) wieder verworfen. Er äußert statt dessen die Idee, an Stelle der Knoten die Flächen zu betrachten und diese so zu rotieren, dass rechtwinklige Strukturen entstehen. Der in dieser Arbeit entwickelte Orthogonalisierungsansatz basiert auf dieser Idee und bezieht zusätzlich die Hauptrichtungen der Gebäude in den Orthogonalisierungsprozess ein. Eine eingehende Beschreibung erfolgt in Kapitel 6.

5 Vereinfachung rechtwinkliger 3D Gebäudemodelle

Im Gegensatz zu allgemeinen Polyedern zeichnen sich 3D Gebäude durch einen hohen Anteil an rechtwinkligen Strukturen aus. Die hier vorgestellten Generalisierungsverfahren, die vor allem eine Vereinfachung (siehe Kapitel 4) zum Ziel haben, aber auch eine Zusammenfassung von Gebäuden oder Gebäudeteilen ermöglichen, beruhen auf dieser Eigenschaft. Sie setzen daher zunächst ideale Eingangsdaten mit streng rechtwinkligen Strukturen voraus. Die Behandlung von nicht orthogonalen Strukturen, vor allem geneigten Dächern, wird in Kapitel 6 dargestellt.

MAYER (1998b) schlägt für die automatische Generalisierung überwiegend rechtwinkliger Strukturen eine Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum vor (siehe auch Abschnitt 4.2.2). Im Folgenden wird dieser Ansatz zunächst weiterentwickelt. Dabei wird die Anwendung der mathematischen Morphologie konzeptionell übernommen und lediglich mit einer anderen C++-Klassenbibliothek zur Modellierung der 3D Geometrie, insbesondere aber zur Behandlung von Topologieänderungen bei der Verschneidung von Polyedern, neu umgesetzt. Der Krümmungsraum weist bei (MAYER 1998b) große Schwächen auf, die aufgezeigt werden und zu neuen Ideen für seine Ableitung führen. Dabei spielen Krümmung und Konvexität lokaler Strukturen eine wichtige Rolle. Diese Begriffe werden zunächst theoretisch untersucht, bevor die praktische Ableitung des Krümmungsraums erläutert wird. Da sich die Kombination aus den zwei nacheinander angewandten Verfahren mathematische Morphologie und Krümmungsraum als relativ kompliziert, rechenintensiv und nur bedingt zuverlässig erwiesen hat, wird letztendlich ein neuer Ansatz vorgeschlagen, bei dem mit verhältnismäßig einfachen Mitteln die Vorteile von mathematischer Morphologie und Krümmungsraum in einem Prozess vereint werden.

5.1 Mathematische Morphologie in 3D

Nach (MAYER 1998b) kann mathematische Morphologie im 3D Raum durch das Verschieben von Flächen in oder gegen die Richtung ihrer Normalen realisiert werden.¹ Dabei werden alle Flächen gleichzeitig, iterativ und in kleinen Schritten bewegt. Bei der Erosion werden alle Flächen gleichzeitig nach innen und bei der Dilatation nach außen verschoben. Um rechtwinklige Strukturen beizubehalten, werden die Flächen anschließend miteinander verschnitten. Das Verschneiden der Flächen erfolgt in der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Implementierung automatisch durch den 3D ACIS Modeler (siehe Abschnitt 2.1.2). Die im Folgenden abgebildeten 3D Modelle bzw. deren Modifikationen wurden mit ACIS generiert und bearbeitet.²

Durch die gleichmäßige Verschiebung aller Flächen bei Anwendung der mathematischen Morphologie auf 3D Objekte treten wie im 2D Fall (siehe Abschnitt 4.1.2) Maßstabsraumereignisse auf, wie z.B. das Aufspalten oder Verschmelzen (siehe Abb. 5.1) von Gebäudeteilen oder das Wegfallen kleiner Ein- oder Ausbuchtungen. Um die Größe des Objekts beizubehalten, folgt einer Erosion immer eine Dilatation (Opening), und einer Dilatation folgt eine Erosion (Closing).

Analog zur 2D Generalisierung gibt es auch bei 3D Objekten Strukturen, für welche die Operationen der mathematischen Morphologie zu keinem Erfolg bezüglich der Generalisierung führen. In dem in Abbildung 5.2 dargestellten Gebäude fällt der Anbau durch Erosion weg. Der Eingangsbereich, also die kleine Würfel-

¹Dies entspricht einem würfelförmigen Strukturelement für 3D Rasterdaten (Voxelmodell), vorausgesetzt, die Kanten sind parallel zum Raster ausgerichtet, da Rastermodelle nicht rotationsinvariant sind.

²Teilweise erfolgte die Generierung der Ausgangsmodelle auch per Virtual Reality Modeling Language (VRML, ISO/IEC 14772-1:1997). Die Ausgangsmodelle wurden aber vor ihrer Generalisierung durch ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Programm in das von ACIS genutzte SAT-Format konvertiert.

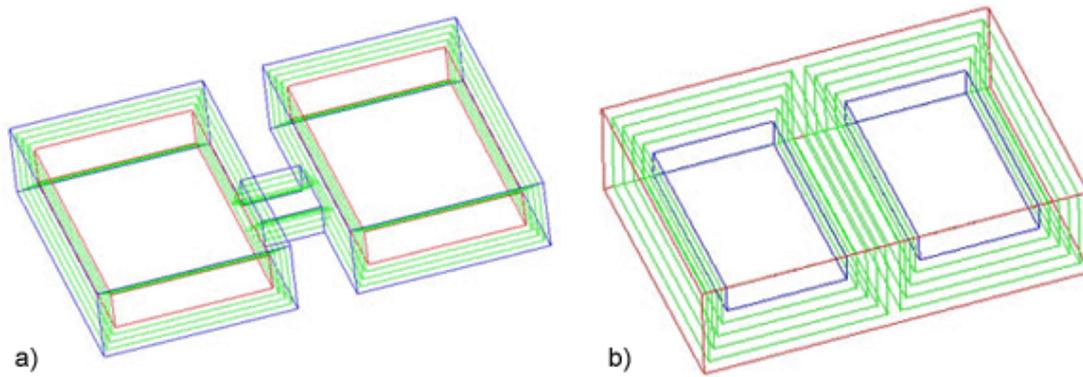


Abbildung 5.1: a) Aufspaltung bei Erosion und b) Verschmelzung bei Dilatation im 3D Raum: blau – Ausgangsobjekt, grün – inkrementelle Schritte, rot – resultierendes Objekt.

bzw. Boxstruktur an der rechten vorderen Ecke des Gebäudes, bleibt aber erhalten. Um auch diese zu eliminieren, muss aus der Sicht von MAYER (1998b) der Krümmungsraum ebenfalls in den 3D Raum übertragen werden. Abbildung 5.3 zeigt, wie den U-, L- und Z-Strukturen der 2D Generalisierung aus Abschnitt 4.1.2 Ein- und Vorsprünge, Box- und Treppen-Strukturen in 3D Objekten entsprechen. Während mit den Operationen der mathematischen Morphologie externe Maßstabsraumereignisse, d.h. Aufspaltung und Verschmelzung, sowie Ein- und Vorsprünge behandelt werden, wird der Krümmungsraum also für das Eliminieren von Box- und Treppenstrukturen benötigt.

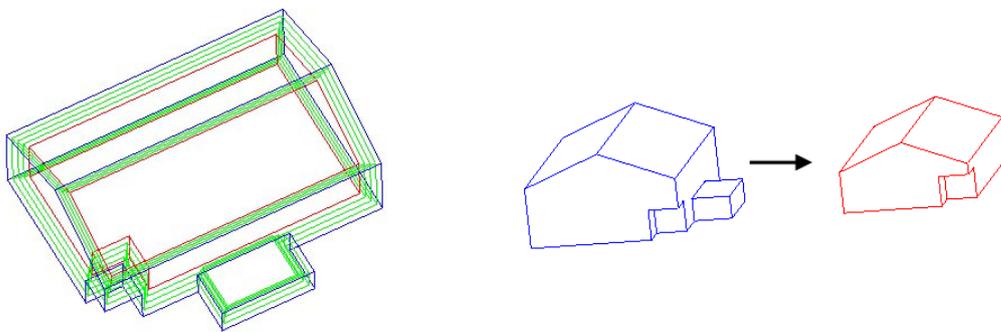


Abbildung 5.2: Der Anbau (vorne, Mitte) wird bei der Erosion eliminiert, die boxförmige Einbuchtung (vorne, rechts) bleibt aber erhalten. blau – Ausgangsobjekt, grün – inkrementelle Schritte, rot – resultierendes Objekt.

2D	U-Struktur	L-Struktur	Z-Struktur	3D	Vorsprung	Boxstruktur	Treppenstruktur
	Morphologie	Krümmungsraum			Morphologie	Krümmungsraum	

Abbildung 5.3: U-, L- und Z-Struktur in 2D entsprechen Vorsprung, Box- und Treppenstruktur in 3D

5.2 Krümmungsraum in 3D

Im Gegensatz zur mathematischen Morphologie werden, wie in Abschnitt 4.2.2 dargestellt, beim 3D Krümmungsraum nach (MAYER 1998b) nur Flächen verschoben, die bezüglich ihrer Abstände unter einem diskreten Schwellwert liegen (diskreter Krümmungsraum), oder es werden alle Flächen bewegt und die Bewegung der Flächen wird für jede Fläche spezifisch gewichtet (kontinuierlicher Krümmungsraum). Die große Herausforderung liegt in beiden Fällen bei der Entscheidung, welche Flächen in welche Richtung verschoben werden müssen, um die gewünschten Maßstabsraumereignisse herbeizuführen. Beim Ansatz von MAYER (1998b) hängt die Auswahl der zu bewegenden Flächen von konkaven Elementen in den 2D Polygonen der benachbarten Flächen ab (siehe Abb. 4.14 und 4.15). Die Zahl der benachbarten Flächen ist kleiner gleich der Zahl der Kanten der Fläche. Vor allem bei komplexen Gebäuden ist oft nicht klar, welches der benachbarten Polygone für die Entscheidung, in welche Richtung die Bewegung einer Fläche erfolgen sollte, herangezogen werden sollte. Auch sind die Relationen der Kanten einer Fläche kein zuverlässiges Kriterium für die Ableitung eines Krümmungsraums im 3D Raum. Deswegen müssen die Relationen zwischen den Flächen einer 3D Struktur genauer untersucht werden. In (FORBERG und MAYER 2002) wurden erste Ideen zu einer Definition des Krümmungsraums formuliert, welche die „Konvexität“ bzw. „Konkavität“ der Strukturen einbezieht. Im Folgenden wird die Bedeutung von „Krümmung“ und „Konvexität“ bzw. „Konkavität“ für lokale 3D Strukturen präzisiert, bevor die neue Definition des Krümmungsraums detailliert beschrieben wird. Dieser kann als Verallgemeinerung des kontinuierlichen Krümmungsraums gesehen werden.

5.2.1 Untersuchungen zum Begriff „Krümmung“

In der Differentialgeometrie ist der Begriff „Krümmung“ für ebene Kurven, Raumkurven und gekrümmte Flächen definiert. Die Krümmung einer ebenen Kurve ist der Grad der Abweichung der Kurve von einer Geraden. Eine Gerade hat die Krümmung $\kappa = 0$. Um das Krümmungsverhalten einer Kurve in einem Punkt zu bestimmen, wird die Veränderung der Tangente gemessen. Je schneller sich die Tangente entlang der Kurve verändert, desto größer ist die Krümmung (BENDER und BRILL 2003). Das Krümmungsverhalten wird also als zweite Ableitung der die Kurve beschreibenden Funktion erhalten. Das Ergebnis der Ableitung ermöglicht unterschiedliche Aussagen zum Krümmungsverhalten der Kurve. Zum einen wird durch das Vorzeichen die Richtung der Krümmung bestimmt, zum anderen beschreibt der Betrag die Stärke der Krümmung bzw. den Radius des Krümmungskreises (Krümmungsradius). Letzterer beträgt $1/\kappa$ und ist der Radius des eindeutigen Kreises, welcher im Punkt P der Kurve die gleiche Krümmung und die selbe Tangente wie die Kurve hat (DAVIES und SAMUELS 1996) (siehe Abb. 5.4a). Bei der Richtung der Krümmung gibt es drei Möglichkeiten. Ist die Ableitungsfunktion in einem Punkt positiv ($\kappa > 0$), d.h. die Steigung der Tangente nimmt beim Durchgang durch den Punkt zu, handelt es sich um eine Linkskrümmung bzw. einen konvex gekrümmten Teil einer (in bezug auf die Tangente) gerichteten Kurve. Ist sie negativ ($\kappa < 0$), d.h. die Steigung der Tangente nimmt ab, liegt eine Rechtskrümmung bzw. ein konkav gekrümmter Teil einer gerichteten Kurve vor. Wenn die Krümmung 0 beträgt, liegt der Punkt entweder auf einer Geraden oder der Drehsinn der Tangente ändert sich, d.h. es handelt sich um einen Wendepunkt (siehe Abb. 5.4b).

Als Bezugssystem für die Berechnung der Krümmung in einem Punkt einer ebenen Kurve dient die Kombination aus Kurvennormale n und Tangente t , auch begleitendes Zweibein genannt. Analog dazu gibt es für Raumkurven das begleitende Dreibein (Frenet'sches Bezugssystem, siehe Abb. 5.5). Dabei kommt zu der Normalen und der Tangente die zu beiden senkrechte Binormale $b = n \times t$ hinzu. Die dadurch aufgespannten Ebenen heißen Schmiegebene (aufgespannt durch t und n), Normalebene (aufgespannt durch n und b) und rektifizierende Ebene (aufgespannt durch t und b). Das Verhalten von Normale, Tangente und Binormale entlang einer Raumkurve wird durch die Serret-Frenet Formeln beschrieben (CASEY 1996):

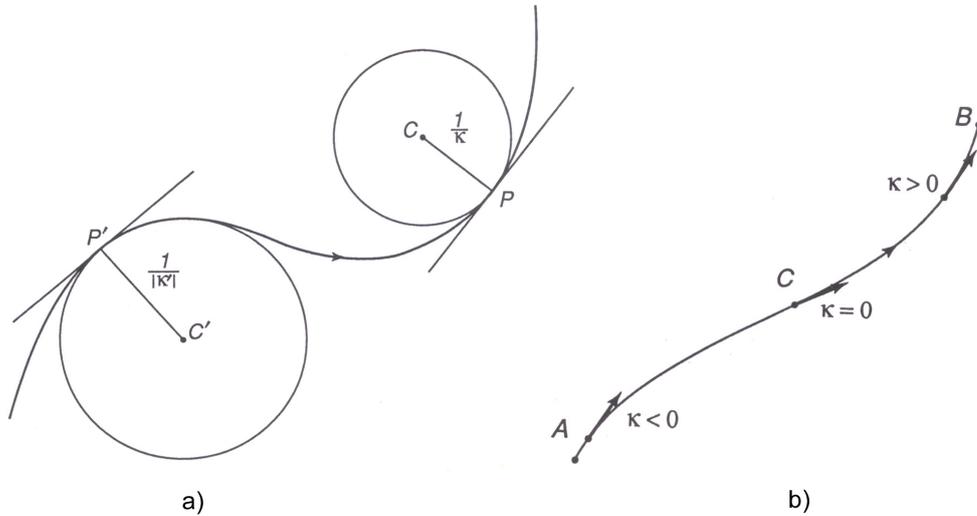


Abbildung 5.4: a) Krümmungskreise, b) Änderung der Krümmung entlang einer Kurve (CASEY 1996)

$$\frac{\delta t}{\delta s} = \kappa n, \quad \frac{\delta n}{\delta s} = -\kappa t + \tau b, \quad \frac{\delta b}{\delta s} = \tau n, \quad (5.1)$$

wobei s die Bogenlänge und τ die Windung oder Torsion der Kurve ist.

Für die Krümmung von Flächen wird zunächst die Krümmung von einzelnen Flächenkurven betrachtet. Die Normalkrümmung einer Flächenkurve in einem Punkt P_0 ist gleich der Krümmung des sie in P_0 berührenden ebenen Normalschnitts (LAUGWITZ 1977). Die Schnittebene wird um den Punkt P_0 rotiert und die maximale und minimale Krümmung κ_1 und κ_2 werden ermittelt. Diese werden als Hauptkrümmungen bezeichnet. Aus ihnen lässt sich die mittlere Krümmung $H = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$ und die gaußsche Krümmung $K = \kappa_1 \kappa_2$ ableiten.

Die in dieser Arbeit verwendeten Gebäudemodelle bestehen aus planen Flächen. Sie haben aus theoretischer Sicht keine bzw. keine eindeutige Krümmung, da die Flächen selbst plan sind und die Krümmung entlang der Kanten und an den Knoten nicht definiert ist, da die Oberfläche dort nicht C^2 differenzierbar ist. DYN et al. (2000) umgehen z.B. dieses Problem für Dreiecksnetze indem sie annehmen, dass das Netz eine stückweise lineare Annäherung an eine unbekannte glatte Oberfläche ist. Abbildung 5.6 zeigt die für die Berechnung der gaußschen und mittleren Krümmung genutzten Variablen sowie das Ergebnis, hier in Form des Schmiegezyklinders entlang einer Kante.

Während sich für unregelmäßige Dreiecksnetze Krümmung in unterschiedlichen Winkeln zwischen benachbarten Flächen, d.h. zwischen ihren Normalen äußert, sind die Winkel für rechwinklig aufgebaute Objekte wie Gebäude auf 90° oder 270° beschränkt. Für eine lokale Struktur bzw. eine Einheit von drei Flächen an einem Knoten steht also nur eine kleine Auswahl an Winkelkombinationen zur Verfügung: alle drei Flächen haben 90° Innenwinkel, alle drei besitzen 270° Innenwinkel und es treten zwei Mischformen auf. In unmittelbarer Nähe eines Knotens ist das Verhalten für alle rechtwinkligen Strukturen also ähnlich zu erwarten.

Für die Entscheidung, ob ein Objektteil bei der Gebäudevereinfachung auf Grund großer Krümmung eliminiert werden soll, ist daher die Größe einzelner Objektteile einzubeziehen. Hierbei spielen die Längen der in einem Knoten zusammentreffenden Kanten eine besondere Rolle. Für den 2D Fall von rechtwinkligen Gebäudekonturen geht MAYER (1998b), wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, ebenfalls implizit von einer Annäherung einer glatten Kurve an die aus geraden Kanten zusammengesetzten Konturen aus. Objektteile mit kurzen Kanten werden als

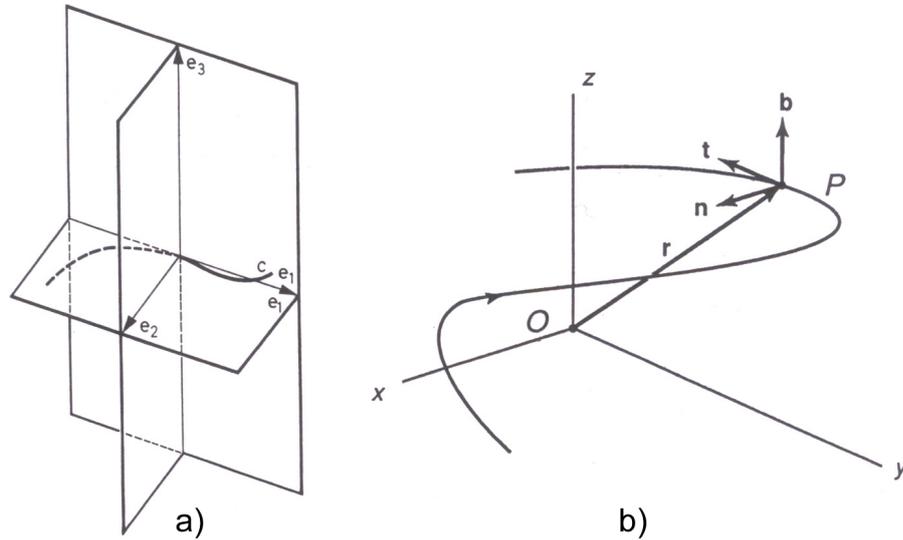


Abbildung 5.5: a) Die drei Ebenen des eine Raumkurve begleitenden Dreibeins (e_1, e_2, e_3 entsprechen t, n, b) (KLINGENBERG 1973), b) Eine Raumkurve und ihr begleitendes Dreibein nach Serret-Frenet (CASEY 1996)

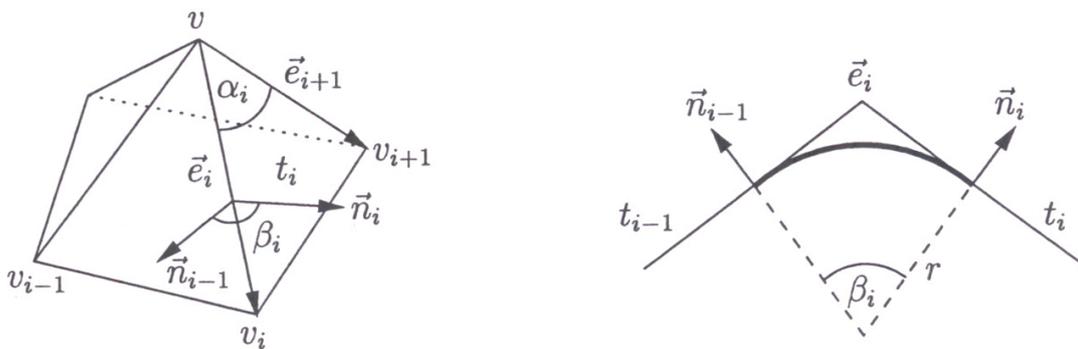


Abbildung 5.6: Links: ein Knoten v und die zugehörigen Variablen für die lokale Anordnung (e : Kanten, t : Dreiecke, n : Normalen), rechts: Der Schmiegezyylinder entlang der Kante \vec{e}_i zwischen den Dreiecken t_{i-1} und t_i , von der Seite gesehen (DYN et al. 2000)

stark gekrümmt angesehen. Als Krümmungsradius wird die halbe Länge der kürzeren Kante an einem Knoten gewählt. 3D Objekte können ähnlich betrachtet werden. Bei rechtwinkligen 3D Strukturen treffen immer drei Kanten an einem Knoten aufeinander. Wählt man die halbe Länge der kürzesten Kante als Krümmungsradius R , so erhält man eine Kugel, die sich so an die 3D Struktur schmiegt, dass alle drei den Flächen entsprechenden unendlich ausgedehnten Ebenen berührt werden (siehe Abb. 5.7). Diese Krümmungskugel bzw. ihr Radius wird im Folgenden als ein Maß für die Krümmung in einem Knoten angesehen. Die Entscheidung, ob eine Struktur eliminiert werden soll, ist von diesem Maß abhängig. Kürzere Kanten ergeben eine höhere Krümmung und die Struktur, zu welcher der Knoten gehört, wird eher eliminiert als Strukturen mit ausschließlich langen Kanten.

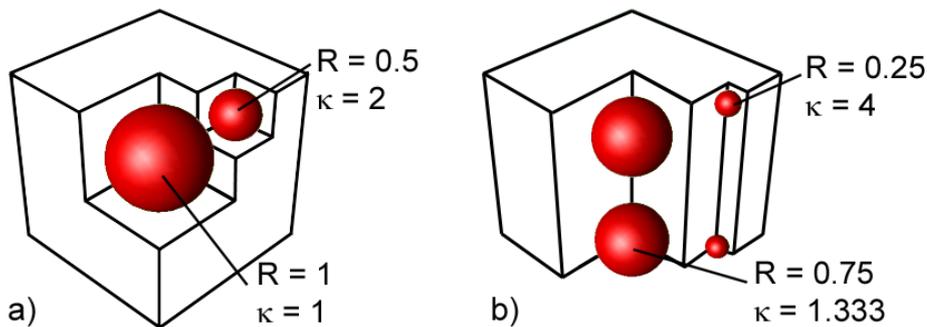


Abbildung 5.7: Krümmungskugeln für a) rein konkave Knoten und b) hybride Knoten (Kugel berührt nur zwei der an den Knoten angrenzenden Flächen). Krümmungsradius ist abhängig von kürzester benachbarter Kante, Krümmung $\kappa = 1/R$

Neben der Stärke der Krümmung lässt die Lage der Kugel außerdem Rückschlüsse auf die Art des Knotens zu. D.h., es kann ermittelt werden, inwiefern der Knoten konvex oder konkav ist. Auf die Bestimmung der Konvexität bzw. Konkavität sowie auf ihre Bedeutung für die Definition des Krümmungsraums zur Gebäudevereinfachung geht der folgende Abschnitt ein.

5.2.2 Konvexität und Konkavität lokaler Strukturen

Ein Teil eines Körpers wird als konvex bezeichnet, wenn er nach außen gewölbt ist. Eine nach innen gerichtete Wölbung ist konkav. Bei gerichteten Kurven wird in konvexe und konkave Krümmungen unterschieden, je nachdem, auf welcher Seite der Tangente die Kurve verläuft. Für 3D Strukturen eines geschlossenen Körpers hängt die Konvexität bzw. Konkavität einer lokalen Struktur von der Relation ihrer Komponenten zum restlichen Objekt ab. Ein (rundum) konvexer Körper hat die Eigenschaft, dass jeweils zwei beliebige Punkte innerhalb des Körpers durch eine gerade Linie miteinander verbunden werden können, ohne dass ein Teil der Linie außerhalb des Körpers verläuft (LATHAM 1995). Bei der Untersuchung von lokalen 3D Strukturen auf Konkavität wird für rechtwinklige Strukturen davon ausgegangen, dass eine konkave Kante durch einen 270° Innenwinkel ihrer zugehörigen Flächen und eine konvexe Kante durch einen 90° Innenwinkel charakterisiert wird.

Die Konvexität bzw. Konkavität der Kanten beschreibt aber nur die Relation von zwei Flächen zueinander. Allgemeiner ist die Betrachtung der Knoten, an denen für rechtwinklige Strukturen immer drei Flächen aufeinander treffen. Wird die Krümmung in einem Knoten durch die in Abschnitt 5.2.1 eingeführte Krümmungskugel beschrieben, kann über die Lage der Kugel zum Objekt auf die Art des Knotens geschlossen werden. Berührt die Kugel alle drei Flächen und nicht nur die ihnen entsprechenden unendlich großen Ebenen und liegt innerhalb des Objekts, handelt es sich um einen vollkommen konvexen Knoten. Liegt die Kugel dagegen außerhalb des Objekts, ist es ein vollkommen konkaver Knoten. Berühren nur zwei der Flächen die Kugel, handelt es sich um eine hybride Form, z.B. einen der Knickpunkte einer Treppenstruktur.

Die praktische Berechnung der Konvexität bzw. Konkavität eines Knotens bzw. der Lage der Krümmungskugel zum Objekt erfolgt mittels der Kanten, die in dem Knoten aufeinander treffen. Die gerichteten Kanten, welche zu dem Knoten zeigen, werden geringfügig verlängert (siehe Abb. 5.8), und die Relationen der neuen Endpunkte zu dem Objekt werden überprüft. Es sind drei verschiedene Relationen möglich: innerhalb des Objekts, außerhalb des Objekts und auf der Begrenzung der Oberfläche des Objekts liegend. Liegen alle verlängerten Kantenendpunkte innerhalb des Objekts, liegt die Krümmungskugel außen und berührt alle drei Flächen, d.h. der Knoten ist vollkommen konkav (siehe Abb. 5.9). Liegen die Endpunkte alle außerhalb, liegt die Kugel innen und der Knoten ist konvex. Liegen zwei Endpunkte auf der begrenzenden Oberfläche, werden nur zwei Flächen von der Krümmungskugel berührt. Ist der dritte Endpunkt außen, handelt es sich um einen Knickpunkt.

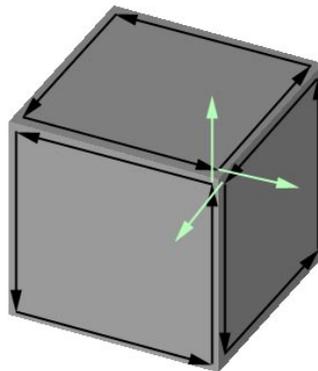


Abbildung 5.8: Die gerichteten Kanten, welche auf einen Knoten zeigen, werden verlängert.

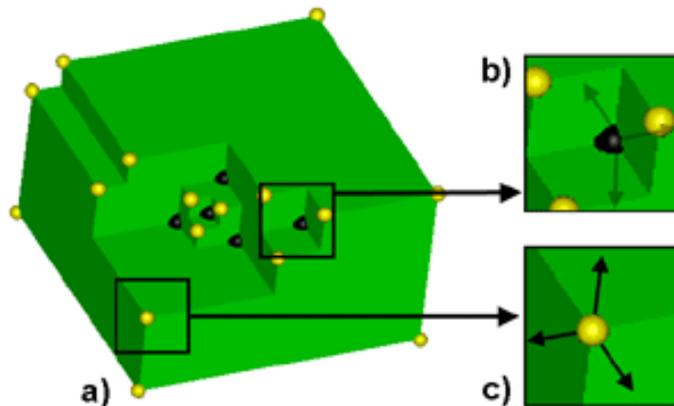


Abbildung 5.9: Liegen die Endpunkte der verlängerten gerichteten Kanten alle innerhalb des Objekts, ist der Knoten b) konkav, liegen alle außerhalb, ist er c) konvex.

Die Lage der Krümmungskugel beschreibt nur das Verhalten der 3D Struktur in unmittelbarer Nähe eines Knotens. Für die Entscheidung, in welche Richtung Flächen bewegt werden müssen, um Maßstabsraumereignisse und damit eine Vereinfachung herbeizuführen, sind weitergehende Informationen bezüglich der Relationen zwischen den Flächen notwendig. So müssen Verschachtelungen unterschiedlicher 3D Strukturen berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Bewegungsrichtungen der Flächen im anschließenden Vereinfachungsprozess erfolgt auf Grundlage der Kombination der Knotentypen der Flächen. Konvexität oder Konkavität der Flächen

wird im Weiteren so verstanden, dass Flächen, welche im Generalisierungsprozess nach außen verschoben werden müssen, um eine Vereinfachung hervorzurufen, als konkav klassifiziert werden. Flächen, welche nach innen verschoben werden müssen, werden als konvex angesehen. Die verwendete Vorgehensweise zur Ermittlung konkaver und konvexer Flächen für den Krümmungsraum wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

5.2.3 Krümmungsraum-Operationen

Für die Anwendung des Krümmungsraums werden zunächst alle Knoten wie oben beschrieben als rein konkave und konvexe Knoten, Knickpunkte sowie sonstige Knoten, die keiner bestimmten Struktur zugeordnet und im weiteren Prozess nicht berücksichtigt werden (siehe Abb. 5.10), charakterisiert. An die Charakterisierung der Knoten schließt sich die Analyse der Flächen an.

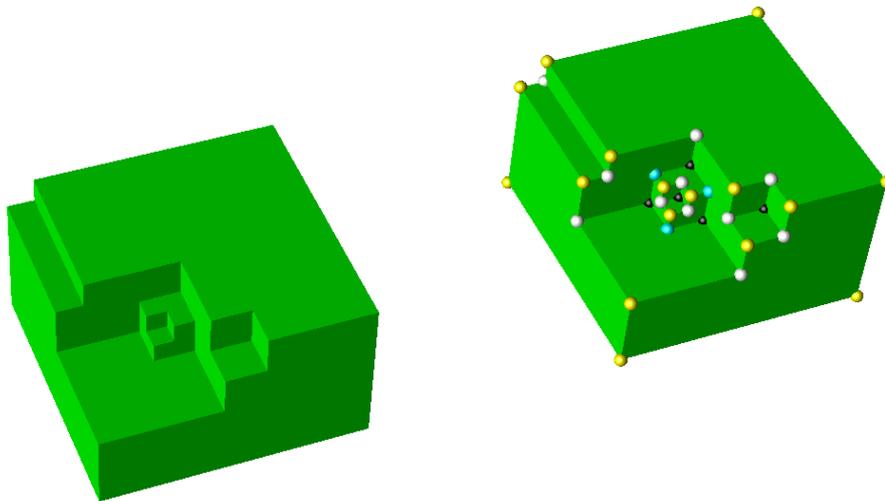


Abbildung 5.10: Klassifizierung der Knoten in rein konkave (schwarz) und konvexe (gelb) Knoten, sowie in Knickpunkte (weiß) und restliche (hybride) Knoten (hellblau)

Die Strukturen, die nur durch den Krümmungsraum eliminiert werden können, werden in Box- und Treppenstrukturen unterteilt. Bei den Boxstrukturen sind neben den nach innen gerichteten Boxen im verschachtelten Fall auch in ersteren enthaltene, nach außen gerichtete Boxen möglich. Vielfältige Verschachtelungen unterschiedlicher Strukturen sind denkbar, was die Ermittlung der Bewegungsrichtung für die einzelnen Flächen erschwert. Nach außen gerichtete Boxstrukturen treten nur eingebettet in nach innen gerichteten Strukturen auf. Wären, unter der Annahme, dass das Objekt überall durch rechte Winkel beschrieben ist, nur rein konvexe Flächen vorhanden, kann es sich nur um ein Quader handeln und eine Vereinfachung wäre nicht mehr nötig.

Box- und Treppenstrukturen zeichnen sich immer dadurch aus, dass mindestens ein konkaves Element vorhanden ist. Bei Treppenstrukturen ist dies eine konkave Kante und bei Boxstrukturen eine oder mehrere konkave Knoten. Zunächst werden daher alle Flächen, welche an einem konkaven Knoten zusammentreffen, daraufhin untersucht, ob sie alle nur diesen einen konkaven Knoten besitzen. Ist dies der Fall, gehören alle drei Flächen zu einer komplett konkaven Boxstruktur, d.h., sie werden als konkav eingestuft und werden in einem späteren Schritt nach außen bewegt (siehe Abb. 5.11, Flächen sind für diesen Fall rot dargestellt). Besitzt mindestens eine der Flächen einen weiteren konkaven Knoten, kann die Struktur nicht rein konkav sein, sondern setzt sich aus konkaven und konvexen Flächen zusammen, d.h. konkave und konvexe 3D Strukturen sind ineinander

verschachtelt. In diesem Fall müssen alle drei Flächen weiter untersucht werden. Enthält die einzelne Fläche nur einen einzigen konkaven Knoten, so ist sie konvex (gelb) und gehört zu einer nach außen gerichteten Boxstruktur. Enthält sie mehrere konkave Knoten, ist sie konkav (magenta).

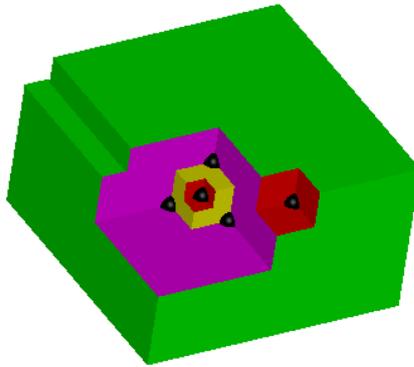


Abbildung 5.11: Untersuchung aller Flächen mit konkaven Knoten – Ist der konkave Knoten der einzige in allen mit dem Knoten verbundenen Flächen: vollkommen konkave Flächen (rot); Sonst werden die Flächen einzeln betrachtet: enthält eine Fläche einen weiteren konkaven Knoten, so ist sie konkav, enthält aber noch andere Strukturen (magenta); enthält eine Fläche keine weiteren konkaven Flächen, so ist sie konvex (gelb)

Nachdem auf diese Weise die Konkavität bzw. Konvexität der Flächen unterschiedlicher Boxstrukturen ermittelt wurden, werden in einem weiteren Schritt die konkaven Flächen von Treppenstrukturen bestimmt. Während für die Boxstrukturen zunächst die konkaven Knoten ermittelt wurden, werden hier konkave Kanten untersucht. Hierbei spielt die Art der die Kanten begrenzenden Knoten eine Rolle. Konkave Kanten sind auch in Boxstrukturen anzutreffen, werden dort aber auf einer Seite von einem konkaven Knoten begrenzt. Konkave Kanten von Treppenstrukturen sind dagegen auf beiden Seiten durch Knickpunkte, also Punkte bei denen zwei der verlängerten gerichteten Kanten am Rand und eine außerhalb des Objekts endet, begrenzt. Die beiden zu solch einer Kante gehörenden Flächen werden als Flächen einer Treppenstruktur (grau) klassifiziert (siehe Abb. 5.12).

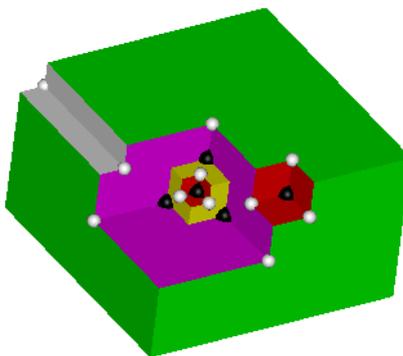


Abbildung 5.12: Liegt einer der Endpunkte der verlängerten gerichteten Kanten außen und zwei Endpunkte liegen auf der begrenzenden Oberfläche, handelt es sich um einen Knickpunkt (weiß). Ist eine Kante von zwei Knickpunkten begrenzt, sind die zu ihr gehörenden zwei Flächen die konkaven Teile einer Treppenstruktur (grau).

In Abbildung 5.13 werden die konkaven Flächen (rot, magenta, grau) nach aussen bewegt und die konvexen, in andere Strukturen eingebetteten Flächen (gelb) nach innen. Verschiedene Objektteile werden in Abhängigkeit von ihrer Größe eliminiert. Die Werte für die jeweiligen minimal erlaubten Kantenlängen, d.h. die Stärke der Krümmung bzw. der Maßstab, wurden manuell ausgewählt. Aufgrund der Änderungen der Relationen zwischen den Flächen nach einem Maßstabsraumereignis muss nach jeder Topologieänderung eine erneute Analyse des Objekts erfolgen. Ansonsten würden Flächen für eine Bewegung ausgewählt werden, die aufgrund ihrer Verschmelzung mit anderen Flächen bereits nicht mehr existieren. Die jeweilige Bewegungsweite einer Fläche für ein Maßstabsraumereignis hängt von den Kantenlängen ab. Es wird die kürzeste Kante genommen, ihre Länge durch die Schrittgröße (hier 0,05 Einheiten) geteilt und so die Anzahl der Iterationen für ein Maßstabsraumereignis festgelegt. Nach einer mit Letzterem verbundenen Topologieänderung werden die noch vorhandenen konkaven und konvexen Flächen ermittelt. Nachdem sie wieder in ihre Ursprungsposition zurück bewegt wurden, werden sie erneut daraufhin überprüft, ob sie aufgrund ihrer Krümmungen, d.h. Kantenlängen, eliminiert werden sollen.

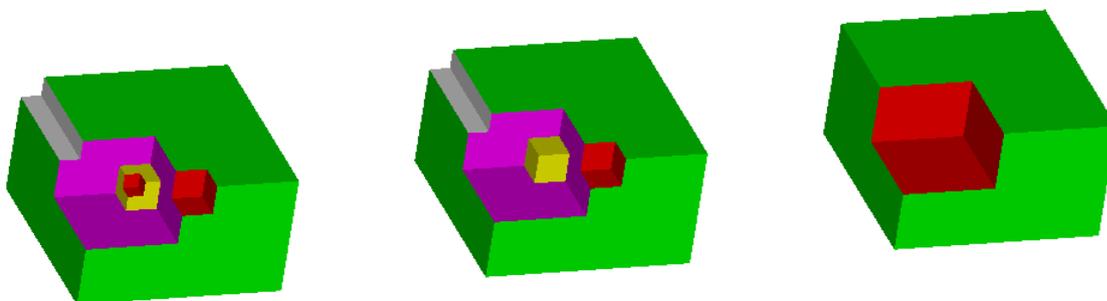


Abbildung 5.13: Nach jedem Vereinfachungsschritt werden die Strukturen neu untersucht. Konkave Strukturen (Bewegung nach Außen): Rot (vollkommen konkave Box-Struktur), Magenta (konkave Box-Struktur, aber eingebettet in andere Struktur), Grau (konkave Treppen-Struktur); Konvexe Strukturen (Bewegung nach Innen, da eingebettet in andere Struktur): Gelb (konvexe Box-Struktur)

MAYER (1998b) unterscheidet zwischen diskretem und kontinuierlichem Krümmungsraum (siehe Abschnitt 4.2.2). Bei dem hier vorgestellten Krümmungsraum werden nur spezifische Flächen bewegt, worin er dem diskreten Krümmungsraum entspricht. Allerdings ist kein Schwellwert für die zu bewegenden Flächen involviert, weswegen der so erhaltene Krümmungsraum sehr viel stärker dem kontinuierlichen Krümmungsraum entspricht, allerdings deutlich allgemeiner als dieser ist. Im Gegensatz zu dem Ansatz von MAYER (1998b) wird die Bewegung der einzelnen Flächen nicht mit der Flächengröße gewichtet.

5.3 Parallelverschiebung

Ziele der Entwicklung eines Generalisierungsverfahrens sind u.a. Einfachheit und Allgemeingültigkeit, d.h. zufriedenstellende Ergebnisse für möglichst viele Objekte. Bisher wurden in dieser Arbeit für die Generalisierung paralleler 3D Strukturen zwei Verfahren vorgestellt, die nacheinander angewandt werden. Je nachdem, welcher Generalisierungsfall vorliegt, d.h., ob es sich um Ein-/Ausbuchtungen bzw. Verschmelzung/Aufspaltung (externe Maßstabsraumereignisse) oder um Box- und Treppenstrukturen handelt, wirkt entweder die mathematische Morphologie oder der Krümmungsraum. Abhängig davon, ob zuerst die mathematische Morphologie oder der Krümmungsraum ausgeführt wird, kann das Ergebnis variieren (siehe Abb. 5.14 für ein in 3D übertragbares 2D Beispiel), es ist also nicht eindeutig.

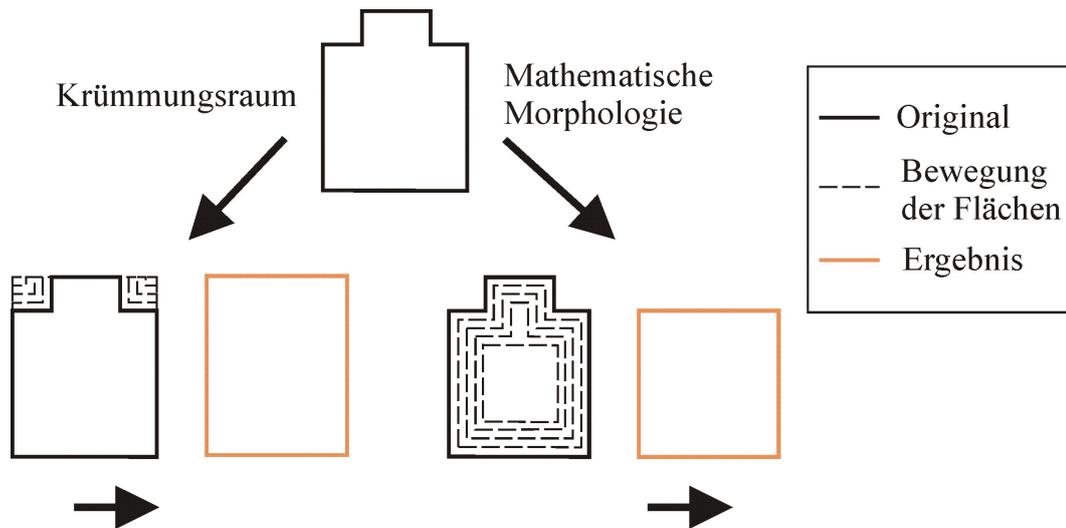


Abbildung 5.14: Das Generalisierungsergebnis hängt von der Reihenfolge der einzelnen Operationen ab.

Der Krümmungsraum bedingt außerdem eine relativ intensive Analyse des Objekts (siehe Abschnitt 5.2). Der Wunsch nach einer Vereinfachung und Verallgemeinerung des Verfahrens gekoppelt mit Überlegungen, die während der Tests mit der mathematischen Morphologie entstanden und welche in Abschnitt 7.1 näher erläutert werden, führten zu dem im Folgenden vorgestellten Ansatz. Dieser kombiniert für (Gebäude-) Daten, die zumindest teilweise aus zueinander senkrechten Flächen bestehen, die Vorteile der mathematischen Morphologie mit denen des Krümmungsraums. Er basiert auf der simplen Idee, parallele Flächen gegeneinander zu verschieben. Es können alle orthogonalen 3D Strukturen, die bisher entweder durch mathematische Morphologie oder durch Krümmungsraumoperationen vereinfacht werden konnten, mit einem einzigen Ansatz generalisiert werden (FORBERG 2004a).

Praktisch werden alle parallelen Flächenpaare und die zwischen ihnen liegende Distanz berechnet. Für das Paar mit der kürzesten Distanz wird geprüft, ob diese unter einem vorgegebenen, den Maßstab bestimmenden Schwellwert liegt. Ist dies der Fall, werden die Flächen so aufeinander zu bewegt, dass sich ihre Ebenen treffen, u.U. also eine Verschmelzung der Flächen erfolgt (siehe Abb. 5.15).

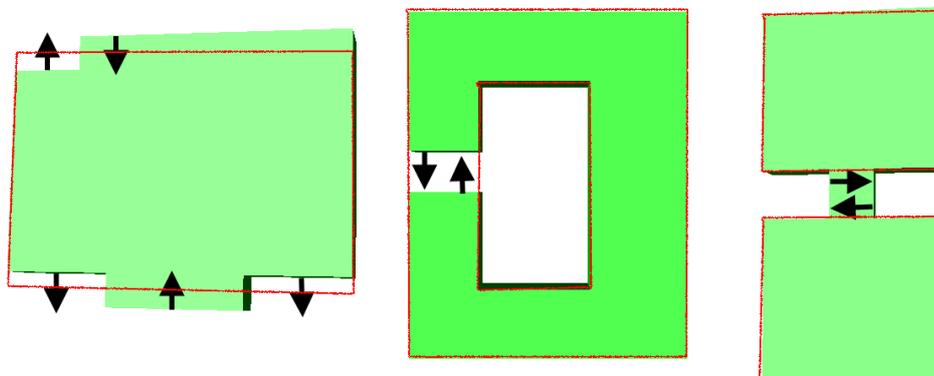


Abbildung 5.15: Parallele Flächen unter bestimmter Distanz werden aufeinander zu bewegt. Das Ergebnis ist in rot dargestellt.

Die Verschmelzung findet nur dann statt, wenn sich die Flächen nach der Verschiebung überlappen. Ist dies wie in den Beispielen in Abbildung 5.16 nicht der Fall, findet nur eine Vereinheitlichung, aber keine Flächenreduktion, statt.

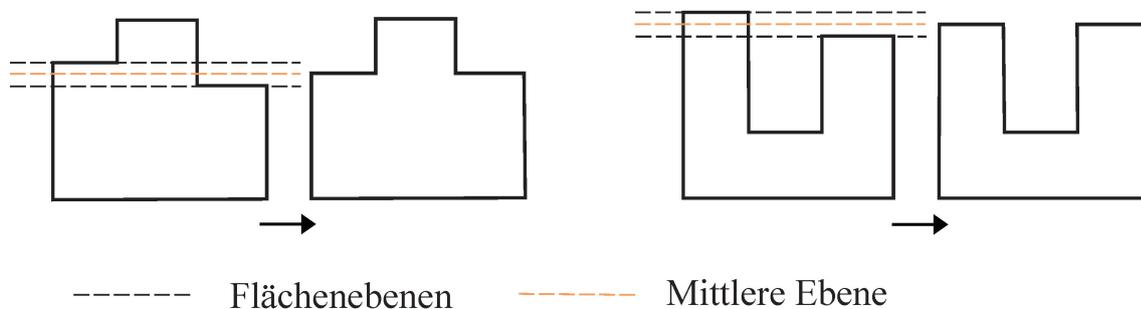


Abbildung 5.16: Liegen die Flächen nach der Verschiebung auf der gleichen Ebene, ohne sich zu berühren, erfolgt keine Flächenreduktion, sondern nur eine Vereinheitlichung.

Nach der Bewegung des ersten Flächenpaares werden erneut die Distanzen zwischen parallelen Flächen berechnet und mit dem Schwellwert verglichen. Auf diese Weise werden alle Flächenpaare nacheinander abgearbeitet, bis die kürzeste Distanz der verbleibenden Paare größer als der Schwellwert ist. Stehen mehrere Flächenpaare mit gleicher Distanz zur Auswahl, erfolgt die Wahl des zuerst zu bewegenden Flächenpaares zufällig.

Im Gegensatz zu mathematischer Morphologie und Krümmungsraum werden die Flächen bei diesem Ansatz nicht iterativ in kleinen Schritten, sondern jeweils paarweise in einem Schritt bewegt. Die Bewegungsweiten für die einzelnen Flächen müssen so gewählt werden, dass beide zusammen die zwischen ihnen liegende Distanz überbrücken. Hierbei kann unterschiedlich gewichtet werden. Bei den Experimenten in Kapitel 7 wird meist mit der halben Distanz gearbeitet, nur bei deutlichem Größenunterschied werden einzelne Flächen über die gesamte Distanz bewegt.

Ein proportionaler Volumenausgleich durch eine von der Flächengröße abhängige Gewichtung der Bewegung führt dagegen nur in wenigen Fällen zu einem befriedigenden Ergebnis. Weisen die Normalen der gegeneinander zu verschiebenden Flächen unterschiedliche Richtungen auf, werden Lücken geschlossen und ein Volumenausgleich kann durch eine gewichtete Flächenbewegung nicht erreicht werden. Findet ein Volumenausgleich auf andere Art, z.B. durch eine Skalierung, statt, kann dies zu einem unrealistischen Ergebnis führen. So müsste ein Gebäude, bei dem der Innenhof aufgefüllt wird, für einen Volumenausgleich in seinen Ausmaßen schrumpfen. Der Ausgleich fände also nicht an der Stelle statt, an der die Formveränderung auftritt, sondern würde global erfolgen, was meist nicht angemessen ist. Selbst wenn die Normalen die gleiche Richtung aufweisen, die Bewegungen der Flächen also unterschiedlich in Relation zu ihren Normalen erfolgen, ist nicht immer klar ersichtlich, in welche Richtung ein Volumenausgleich stattfinden sollte.

Bei dem Gebäude in Abbildung 5.17 fällt ein boxförmiges Merkmal weg. Die Wahl, welche der drei gleich-abständigen parallelen Flächenpaare gegeneinander verschoben werden, kann nur zufällig erfolgen. Ein eindeutiges Ergebnis ist in diesem Fall nur möglich, wenn eine der kleinen Flächen der Boxstruktur über die ganze Distanz verschoben wird und die dazu parallele, große Fläche ihre Position beibehält.

Mit dieser Vorgehensweise wird gleichzeitig ein weiteres Problem gelöst, welches auftreten kann, wenn eine der beiden Flächen in der Grundrissebene liegt. Werden in diesem Fall beide Flächen bewegt, schwebt das Gebäude nach der Vereinfachung in der Luft (siehe Abb. 5.18). Für die Experimente in Kapitel 7 wird daher zwischen der Verschiebung beider Flächen über die halbe und nur einer Fläche über die komplette Distanz gewählt.

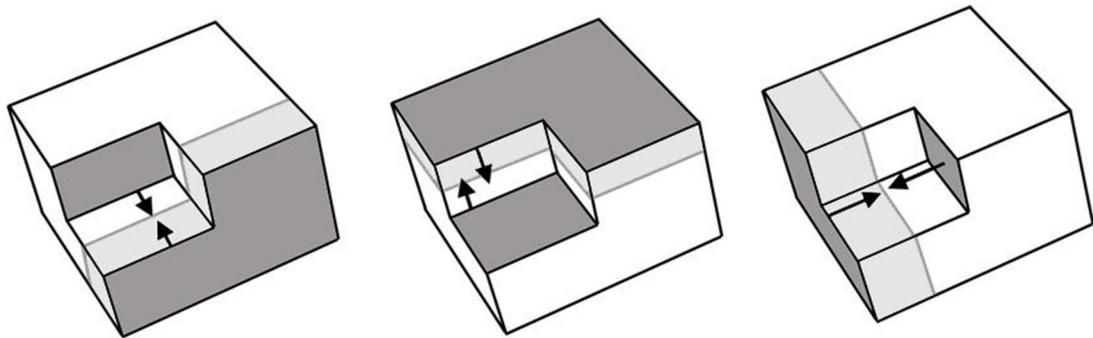


Abbildung 5.17: Innerhalb einer symmetrischen Boxstruktur wird ein Flächenpaar zufällig ausgewählt. Werden beide Flächen zu gleichen Teilen bewegt, geht die Form des Grundkörpers verloren. Das Problem wird umgangen, indem nur die kleinere der beiden Flächen bewegt wird.

Die Wahl erfolgt abhängig vom Verhältnis der Flächengrößen. Für den seltenen Fall, dass die Grundrissfläche nicht deutlich größer ist als eine dazu parallele Fläche, ist zusätzlich unabhängig von der Flächenrelation eine Fixierung der Grundrissebene sinnvoll.

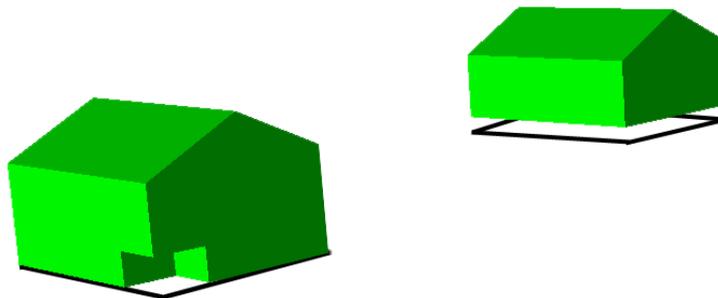


Abbildung 5.18: Die Wahl der gegeneinander verschobenen Flächen der symmetrischen Boxstruktur erfolgt zufällig. Werden zwei horizontale Flächen bewegt, verschiebt sich die Grundrissebene und das Gebäude schwebt in der Luft. Durch eine Fixierung der Grundrissebene kann dies verhindert werden.

Mit dem auf Parallelverschiebung basierenden Ansatz können sowohl Anbauten eliminiert werden als auch Verschmelzungen und Aufspaltungen durchgeführt werden. Dies war vorher vorwiegend oder nur durch mathematische Morphologie lösbar. Zusätzlich können aber Treppenstrukturen und boxförmige Ein- oder Ausbuchtungen eliminiert werden, was vorher nur durch den Krümmungsraum lösbar war. Da die aufwändige Analyse, die für den Krümmungsraum notwendig ist, wegfällt und auf Iterationen verzichtet wird, ist der neue Ansatz deutlich schneller.

Die in Abschnitt 3.2 aufgezeigten Forderungen an einen Maßstabsraum werden von dem Ansatz erfüllt. Durch den Schwellwert für die Flächendistanz ist ein kontinuierlicher Maßstabsparameter gegeben, die Strukturen eines groben Maßstabs haben einen Grund im feineren Maßstab (Kausalität), es wird für alle Bereiche eines Objekts gleich vorgegangen (Homogenität) und die Richtungsabhängigkeit ist zumindest für rechteckige Strukturen ebenfalls erfüllt (Isotropie).

Für die Festlegung der Maßstabsparameter sind eingehende semantische und strukturelle Untersuchungen notwendig. In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur geometrischen Vereinfachung einzelner Gebäude vorgeschlagen, der wichtige Forderungen an einen Maßstabsraum erfüllt und bei dem die Parameter frei gewählt werden können. Da noch kein Regelwerk zur Generalisierung von 3D Gebäuden existiert, erfolgt die Parameterwahl bisher manuell und intuitiv. Die vorliegende Arbeit zeigt technische Möglichkeiten für die Modellgeneralisierung mit Hilfe quantitativer Attribute (siehe Abschnitt 2.2). Die Entwicklung von gestalterischen Regeln oder Konventionen steht noch aus. Eine Erweiterung des Verfahrens, so dass auch die Einbeziehung qualitativer Attribute für eine graphische Gestaltung ermöglicht wird, erscheint möglich.

6 Behandlung nicht rechtwinkliger 3D Gebäudemodelle

Die in Kapitel 5 vorgestellten Ansätze zur Gebäudevereinfachung basieren auf der meist orthogonalen Anordnung der Gebäudeflächen. Rechtwinkligkeit wird als grundlegende Gebäudeeigenschaft angenommen und für die Verfahren vorausgesetzt. Bilden die Flächen des Gebäudes keine rechten Winkel, können Probleme bei der Anwendung der Ansätze in der Art auftreten, dass insbesondere stumpfe Winkel nicht oder nur langsam eliminiert werden. Die Parallelverschiebung beruht auf exakter Parallelität der Flächen. Mit mathematischer Morphologie und Krümmungsraum sind zwar auch nicht orthogonale Strukturen handhabbar, der Unterschied zu rechtwinkligen Strukturen in Bezug auf die dafür benötigte Bewegungsweite der Flächen ist allerdings signifikant. Abbildung 6.1 veranschaulicht die unterschiedliche Wirkung einer Erosion auf rechtwinklige und schiefwinklige Segmente in 2D.

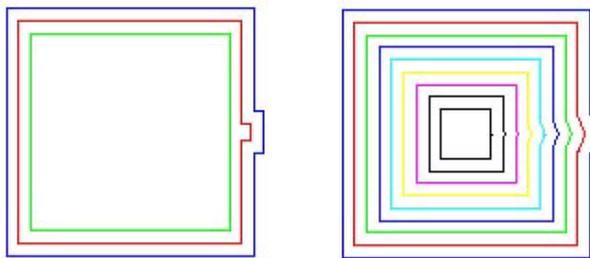


Abbildung 6.1: Rechtwinklige Strukturen werden durch Erosion wesentlich schneller eliminiert als schiefwinklige.

Da Strukturen, welche von der überwiegend vorherrschenden Orthogonalität signifikant abweichen, wesentlich den Charakter eines Gebäudes bzw. des gesamten Siedlungsbildes prägen, müssen sie auch bei der Gebäudegeneralisierung berücksichtigt werden. Dafür ist zu unterscheiden, ob die Winkel deutlich vom rechten Winkel oder 180° abweichen, oder ob die Flächen nur aufgrund der verwendeten Mess- und Modellierungsverfahren nicht exakt orthogonal oder koplanar angeordnet sind. Liegt eine deutliche Abweichung vor, wird diese als gewollt und für den Charakter des Gebäudes bedeutend angesehen. Ist die Winkelabweichung minimal, ist sie für die Charakteristik des Gebäudes unwichtig, führt bei der Vereinfachung mit den beschriebenen Ansätzen aber z.T. zu unbefriedigenden Ergebnissen. Handelt es sich bei der Elimination der Abweichung um eine Bereinigung der Daten, bei der kleine Abweichungen vom rechten Winkel oder von Koplanarität bei der Erfassung korrigiert werden, muss sie aus Sicht dieser Arbeit im Rahmen einer Vorverarbeitung stattfinden, damit die später ausgeführten Generalisierungsverfahren funktionieren können. Wurde das Modell durch eine konstruktive Volumenmodellierung (siehe Abschnitt 2.1.1) rekonstruiert, sind Rechtwinkligkeit und Koplanarität implizit vorgegeben und eine solche Aufbereitung der Daten kann entfallen.

Weichen Winkel deutlich vom rechten Winkel oder von 180° ab, so hängt die Entscheidung, ob eine Struktur wegfallen soll, wie bei rechtwinkligen oder koplanaren Strukturen von der Größe der Struktur und dem Zielmaßstab ab. So fallen Dachgauben bei relativ kleinen Maßstäben weg, während der Dachtyp erst spät eliminiert, d.h. auf ein Flachdach reduziert wird. Da die Vereinfachung des Gebäudes durch die Elimination von nicht rechtwinkligen oder koplanaren Strukturen ebenfalls vom Maßstab abhängt und das Kausalitätsprinzip erfüllt, da nur Strukturen wegfallen, aber keine hinzugefügt werden, kann sie ebenfalls als Maßstabsraumoperation angesehen werden.

Die Elimination geneigter Strukturen bzw. das Erzwingen rechtwinkliger Strukturen wird im Folgenden Orthogonalisierung genannt. Da die Änderung eines Winkels Einfluss auf die anderen Winkel des 3D Objekts hat (siehe Abschnitt 4.2.3), ist die Orthogonalisierung nicht trivial. Die Änderung von Winkeln auf 90° oder 180°

kann z.B. zu einer Scherung des Gebäudes führen. Die Winkel zwischen den Flächen können also nicht für sich alleine betrachtet werden. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, die Hauptrichtungen des Gebäudes zu ermitteln, davon abweichende Flächen zu finden und in die jeweils nächste Hauptrichtung zu zwingen. In Bezug auf ihre Richtungen zum Koordinatensystem wird im Weiteren für Gebäude zwischen drei verschiedenen Flächentypen unterschieden: horizontale, vertikale und geneigte Flächen. Semantisch können diese den Gebäudeebenen Grundrissebene, Wandebene und Dachebene (siehe Abb. 6.2) zugeordnet werden, welche bereits in Abschnitt 2.2 eingeführt wurden. Eine der Hauptrichtungen wird durch die Normale für horizontale Flächen $n = (0, 0, 1)$ beschrieben. Die Normalen der vertikalen Flächen, d.h. Wände, liegen dazu orthogonal. Die Unterschiede zwischen den Richtungen der vertikalen Flächen können daher allein aus ihrer Projektion in die x-y-Ebene des Koordinatensystems bestimmt werden. In dieser Ebene sind weitere Hauptrichtungen aus der Menge aller vertikalen Flächen zu ermitteln.

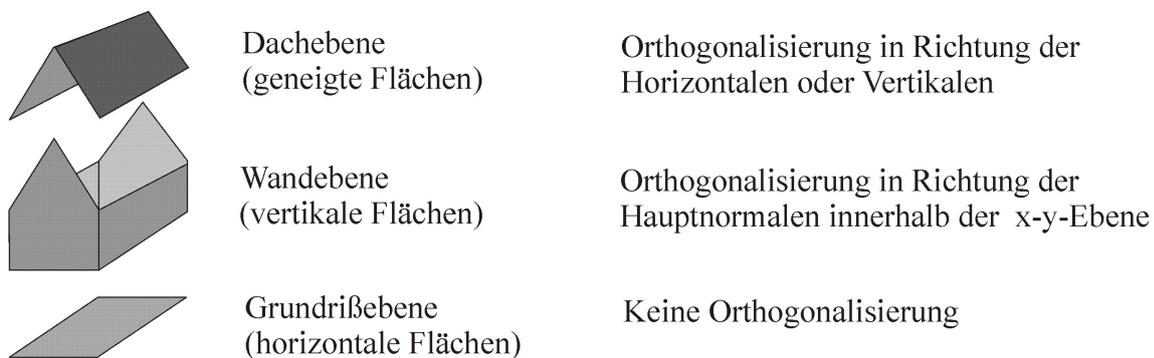


Abbildung 6.2: Aufteilung des Gebäudes in Grundrissebene, Wandebene und Dachebene

Die horizontalen Flächen gehören semantisch entweder zur Grundrissebene oder zur Dachebene (Flachdach). Für den Orthogonalisierungsprozess haben sie keine Bedeutung, da sie bereits in einer der Hauptrichtungen liegen und daher nicht verändert werden müssen. Geneigte Flächen werden als Dachflächen klassifiziert, d.h. semantisch der Dachebene zugeordnet. Sie sind weder horizontal noch vertikal und sind somit leicht zu ermitteln. Für eine Orthogonalisierung müssen die Dachflächen in eine horizontale oder vertikale Richtung gezwungen werden. Die vertikalen Flächen sind Wände, deren Hauptrichtungen innerhalb der x-y-Ebene analog zu 2D Verfahren ermittelt werden können (s.o.). Je nach Stärke der Abweichung und Größe der Struktur, werden die Flächen in die jeweils nächste Hauptrichtung gezwungen oder nicht. Die Orthogonalisierung von Dach- und Wandflächen erfolgt analog zu der semantischen Aufteilung des Gebäudes in die verschiedenen Ebenen getrennt voneinander und wird daher im Folgenden separat beschrieben.

6.1 Elimination geneigter Dachstrukturen

6.1.1 Orthogonalisierung einzelner Dachflächen

Für die Orthogonalisierung der Dachebene werden zunächst die geneigten Dachflächen als diejenigen Flächen ermittelt, die weder parallel noch orthogonal zur horizontalen Ebene $n = (0, 0, 1)$ sind. Horizontale Flächen, die in der Höhe vom Grundriss abweichen, gehören ebenfalls zur Dachebene, werden für die Orthogonalisierung aber zunächst nicht benötigt. Für die Orthogonalisierung bzw. Elimination der geneigten Dachflächen entstanden unterschiedliche Ideen, die zu dem im Folgenden vorgestellten Ansatz führten und auf die kurz in Abschnitt 7.4 eingegangen wird.

Im Weiteren sind zwei Kanten von Bedeutung: die höchste horizontale Kante einer Dachfläche, d.h. der First, und die niedrigste horizontale Kante, d.h. die Traufe. Aufgrund von Annahmen ist der Ansatz zunächst auf Dachflächen begrenzt, welche zumindest eine horizontale Traufe besitzen. Dies ist praktisch keine Einschränkung, da dies für die meisten Dachflächen zutrifft.

Der hier entwickelte und verwendete Ansatz zur Orthogonalisierung von Dächern greift die von MAYER (1998b) formulierte Idee auf, Flächen so zu rotieren, dass rechtwinklige Strukturen entstehen (siehe Abschnitt 4.2.3). Die Rotation der Fläche erfolgt um eine ihrer Kanten, d.h. entweder um die Traufe (siehe Abb. 6.3) oder um den First. Die Rotation einer Fläche um eine ihrer Kanten wird in ACIS als Tapering bezeichnet. Während ursprünglich ein iteratives Vorgehen mit kleinen Winkelschritten angedacht war, werden die Flächen beim vorgestellten Ansatz in ein oder wenig mehr Schritten horizontal oder vertikal gestellt.

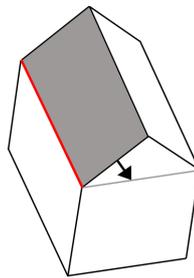


Abbildung 6.3: Tapering in ACIS: Die graue Dachfläche wird um ihre Traufe (rote Linie) in eine horizontale Ebene rotiert.

Die Entscheidung, in welche Richtung und um welche Kante rotiert wird, d.h. ob die Fläche horizontal oder vertikal gestellt wird und ob dafür um den First oder die Traufe rotiert wird, ist, wie schon in (FORBERG 2004b) angedeutet, abhängig von den Eigenschaften der benachbarten Flächen einer Dachfläche. Als benachbarte Flächen werden hierbei jene Flächen angesehen, welche eine der horizontalen Kanten mit der geneigten Dachfläche teilen. Ähnlich wie bei den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Ansätzen von STAUFENBIEL (1973) und SESTER (2001), bei denen für 2D Grundrisse für jede Kante die vorhergehende und die nachfolgende Kante analysiert werden, wird die vorhergehende und nachfolgende Fläche mit herangezogen, um auf die spezifische Struktur zu schließen. Als die vorhergehende Fläche wird diejenige angesehen, die an die Traufe grenzt. Die nachfolgende Fläche grenzt somit an den First. Bei den Flächen wird unterschieden, ob sie horizontal, vertikal oder ebenfalls geneigt sind. Je nach Kombination der vorhergehenden und nachfolgenden Fläche werden Taperkante und -richtung ermittelt. Die neun möglichen Kombinationen aus horizontalen, vertikalen und geneigten Flächen sind in Tabelle 6.1 aufgelistet und in Abbildung 6.4 im Querschnitt als 2D Skizzen graphisch veranschaulicht. Die Wahl der Taperkante und -richtung ist nicht immer eindeutig. Manche Strukturen können auf verschiedene Arten orthogonalisiert werden. Z.B. könnte in 6.4a) auch die Traufe als Taperkante gewählt werden. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird nur die jeweils ausgewählte Möglichkeit gezeigt. Andere Strukturen bzw. deren Handhabung sind aus der Kombination der Neigungen von vorhergehender und nachfolgender Fläche nicht eindeutig ersichtlich und benötigen weitere Informationen, wie z.B. die Richtung der nachfolgenden Fläche oder den Innenwinkel ω zwischen vorhergehender und zu orthogonalisierender Fläche. Diese Zusatzinformationen sind in Tabelle 6.1 als Nebenbedingungen aufgeführt.

Ein Sonderfall, der in Tabelle 6.1 nicht berücksichtigt ist, sind dreieckige Dachflächen, wie sie z.B. bei Walmdächern auftreten. Diese besitzen keine Firstkante, sondern nur einen Firstknoten. Da diese dementsprechend keine nachfolgende Fläche aufweisen, werden sie separat behandelt. Orthogonalisiert werden sie, indem sie um die Traufe vertikal gestellt werden (siehe Tab. 6.2, Abb. 6.5).

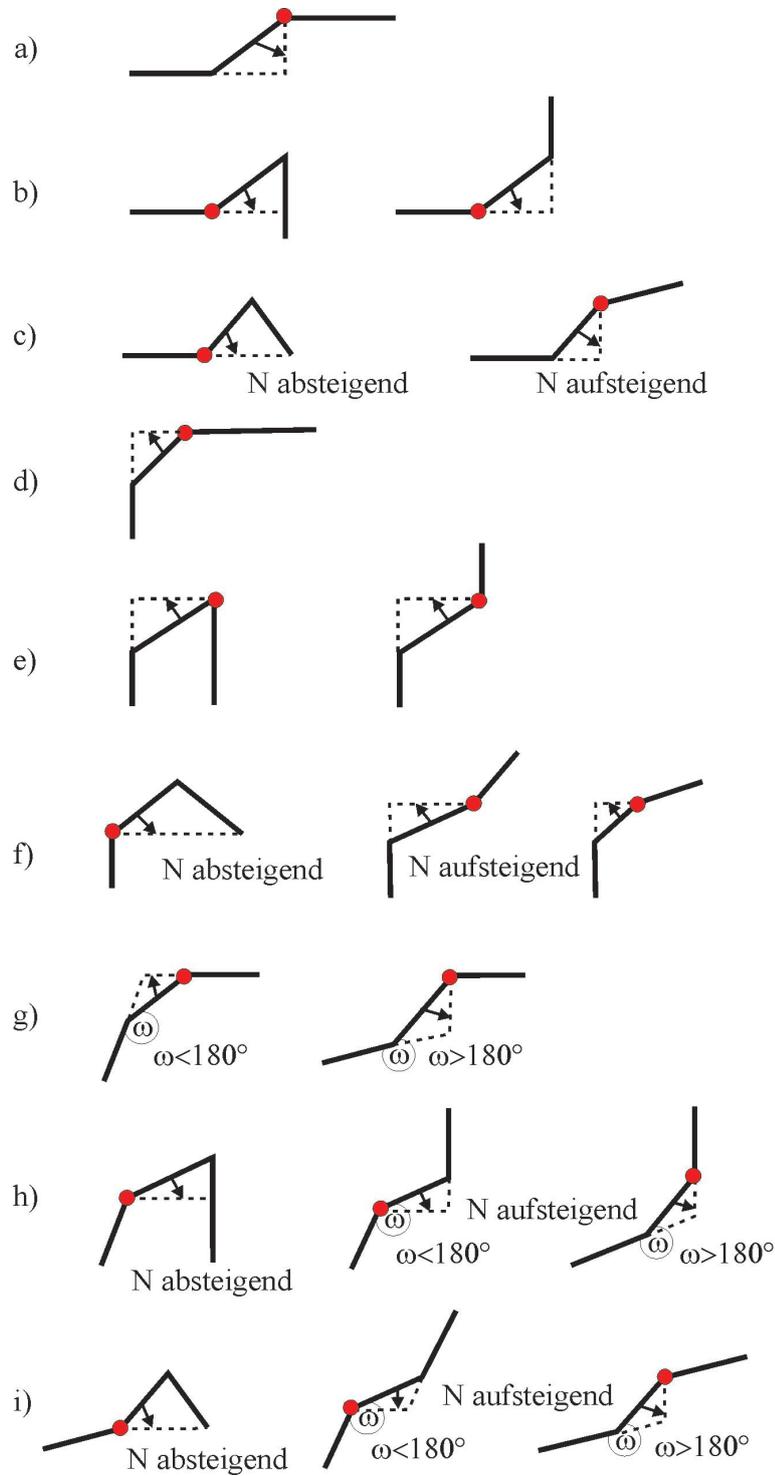


Abbildung 6.4: Skizzen zu Tabelle 6.1 (Querschnitt)

	vorhergehende Fläche V	nachfolgende Fläche N	Nebenbedingungen Richtung von N	Innenwinkel ω	Taperkante	gewünschte Richtung
a)	horizontal	horizontal			First	vertikal
b)	horizontal	vertikal			Traufe	horizontal
c)	horizontal	geneigt	N absteigend		Traufe	horizontal
			N aufsteigend		First	vertikal
d)	vertikal	horizontal			First	horizontal
e)	vertikal	vertikal			First	horizontal
f)	vertikal	geneigt	N absteigend		Traufe	horizontal
			N aufsteigend		First	horizontal
g)	geneigt	horizontal		$\omega < 180^\circ$	First	horizontal
				$\omega > 180^\circ$	First	vertikal
h)	geneigt	vertikal	N absteigend		Traufe	horizontal
			N aufsteigend:	$\omega < 180^\circ$	Traufe	horizontal
				$\omega > 180^\circ$	First	vertikal
i)	geneigt	geneigt	N absteigend		Traufe	horizontal
			N aufsteigend:	$\omega < 180^\circ$	First	horizontal
				$\omega > 180^\circ$	First	vertikal

Tabelle 6.1: Flächenkombinationen für geneigte Dachflächen und deren Taperkante und Taperrichtung für die Dachorthogonalisierung. ω ist der Innenwinkel zwischen vorhergehender Fläche V und der geneigten Dachfläche.

	vorhergehende Fläche V	nachfolgende Fläche N	Nebenbedingungen	Taperkante	gewünschte Richtung
j)	unabhängig vom Flächentyp	nicht vorhanden, da keine Firstkante	Dreieckige Fläche	Traufe	vertikal

Tabelle 6.2: Sonderfall: dreieckige Dachflächen

Für Flächen mit mehr als drei Knoten wird bei einer Rotation um die Traufe der First entlang der Ebene der nachfolgenden Fläche bewegt, und bei einer Rotation um den First die Traufe entlang der Ebene der vorhergehenden Fläche. Für den Sonderfall einer dreieckigen Fläche erfolgt die Änderung nicht entlang einer Ebene, sondern entlang einer horizontal liegenden Kante, welche nicht zwingend im Gebäude vorhanden sein muss.

Erfolgt die Änderung nicht entlang der Ebene der Fläche, sondern entlang der Fläche selbst, kann bei ACIS u.U. durch einen einzelnen Taper-Schritt nicht die gewünschte Änderung des Winkels realisiert werden. Tatsächlich funktioniert dies bei ACIS nur dann, wenn die rotierende Fläche auf ihrem Weg in die Zielrichtung auf keine weiteren Knoten stößt. Liegen Knoten zwischen der Start- und Ziellage der Fläche, muss in mehreren Schritten getapert werden. Praktisch besteht dieses Problem nur, wenn die Taperkante die Traufe ist, die Fläche horizontal gestellt werden soll und die nachfolgende Fläche absteigend ist. Die Anzahl der Taperschritte hängt von der Anzahl der Knoten mit unterschiedlichem z-Wert innerhalb der nachfolgenden Fläche ab. Abbildung 6.6 zeigt ein Gebäude, bei dem zur Orthogonalisierung einer lokalen Satteldach-Struktur in zwei Schritten getapert werden muss. Die Berechnung des Winkels α , welcher von dem angestrebten Taperwinkel abgezogen wird, erfolgt entsprechend Abbildung 6.7.

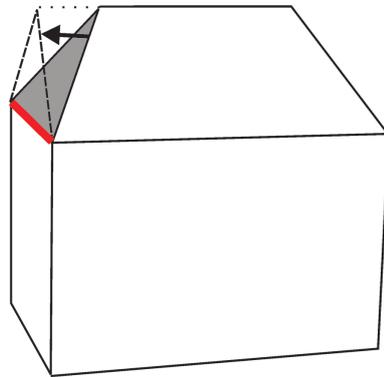


Abbildung 6.5: Skizze zu Tabelle 6.2; dreieckige Flächen werden durch Drehung um die Traufe vertikal gestellt.

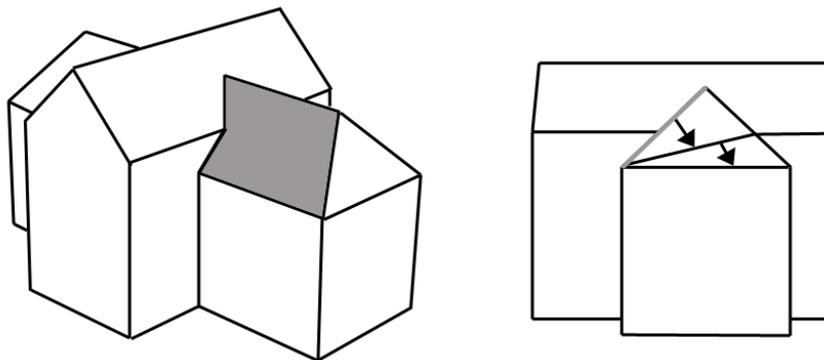
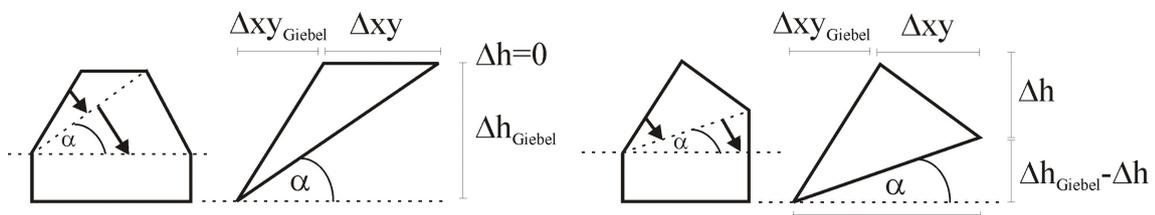


Abbildung 6.6: Die markierte Dachstruktur muss in zwei Schritten getapert werden.



$$\alpha = \arctan\left(\frac{(\Delta h_{\text{Giebel}} - \Delta h)}{(\Delta xy_{\text{Giebel}} + \Delta xy)}\right)$$

Abbildung 6.7: Berechnung des Winkels α , welcher für das zweistufige Tapern vom angezielten Taperwinkel abgezogen werden muss, für zwei Beispieldachkonfigurationen.

6.1.2 Bildung und Orthogonalisierung von Dacheinheiten

Zusätzlich zu der Analyse einzelner Dachflächen bezüglich ihrer spezifischen Struktur in Relation zu ihren benachbarten Flächen werden sämtliche Dachflächen eines Gebäudes daraufhin untersucht, ob sie zu einer gemeinsamen zusammenhängenden Dachstruktur gehören. Werden die Dachflächen nämlich unabhängig voneinander orthogonalisiert, z.B. nur aufgrund ihrer Flächengröße, kann ein Ergebnis wie in Abbildung 6.8 resultieren.

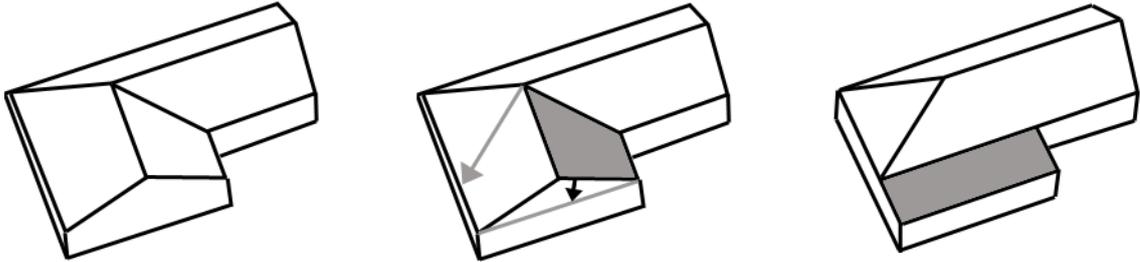


Abbildung 6.8: Ergebnis für Dachorthogonalisierung bei ungünstig gewähltem Parameter für den Flächeninhalt, wenn Zusammenhänge zwischen den Dachflächen nicht berücksichtigt werden

Zur Bildung der Dachstrukturen werden die Firstkanten von Dachflächen daraufhin untersucht, ob sie gemeinsame Knoten besitzen, d.h. ob sie sich berühren. Ist dies der Fall, gehören sie zu einer zusammengehörenden Dachstruktur und die zu den Kanten gehörenden Flächen werden als Einheit betrachtet. Als Kriterium für die Entscheidung, ob eine solche Dacheinheit durch Orthogonalisierung eliminiert wird, hat sich der durchschnittliche Flächeninhalt, d.h. die Summe der Flächeninhalte geteilt durch die Anzahl der Flächen, bewährt. Ein Beispiel für unterschiedliche Dacheinheiten, beschrieben durch zusammenhängende Firstkanten, und ihre Orthogonalisierung, ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

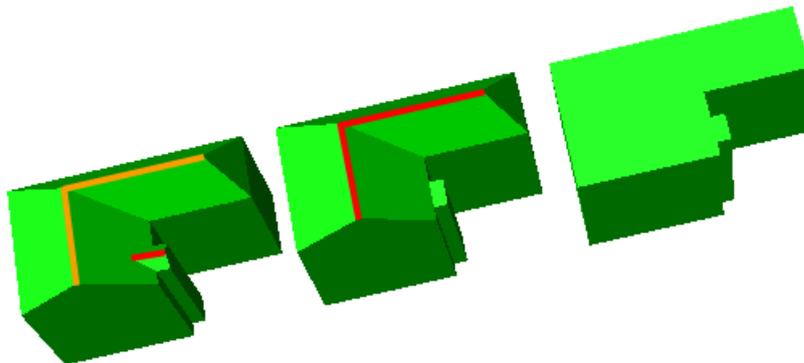


Abbildung 6.9: Dachflächen mit sich berührenden Firstkanten werden zu Dacheinheiten zusammengefasst. Rote Firste bezeichnen Dacheinheiten mit relativ kleinem durchschnittlichen Flächeninhalt, die Flächen der gelben Firste bleiben erhalten. Von links nach rechts: Schrittweise Orthogonalisierung der Dachebene je nach durchschnittlicher Flächengröße pro Dacheinheit.

6.2 Orthogonalisierung der Wände

Während in dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass bei kleinem Maßstab, d.h. großem Maßstabsparameter, auch grundlegende Dachtypen eliminiert bzw. auf Flachdachgebäude reduziert werden müssen, wird angenommen, dass in der Wandebene sehr große Strukturen mit signifikanter Neigung gegenüber anderen Strukturen bzw. die entsprechenden Hauptrichtungen auch bei sehr kleinen Maßstäben beizubehalten sind. Orthogonalisiert werden müssen in erster Linie kleine Strukturen und Strukturen mit kleinen Abweichungen vom rechten Winkel oder von 180° (siehe Abb. 6.10). Kleine Abweichungen vom rechten Winkel oder von 180° entstehen im Wesentlichen durch Abweichungen bei der Messung und Modellierung des Gebäudes während der Rekonstruktion. Eine Bereinigung muss vor den in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren zur Gebäudevereinfachung stattfinden, damit diese erfolgreich angewandt werden können bzw. zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führen. Für die Vorverarbeitung ist z.B. die von KADA (2002a) genutzte 3D Ausgleichung denkbar (siehe Abschnitt 4.2.1).



Abbildung 6.10: Große Winkelabweichungen müssen für große Strukturen beibehalten werden (links), für kleine Objektteile ist aber eine Orthogonalisierung sinnvoll (rechts).

Während die Bereinigung der Daten also im Rahmen einer Vorverarbeitung erfolgen sollte, ist die Orthogonalisierung kleiner Strukturen, die deutlich von der orthogonalen Struktur abweichen, ein Bestandteil der maßstabsabhängigen Generalisierung. Die Orthogonalisierung der Wände ist anspruchsvoller als die Eliminierung von Dächern, da für Wände keine vorgegebene Referenzrichtung wie die Vertikale bei Dächern vorhanden ist, mit der die Flächen direkt verglichen werden können. Dachflächen können leicht identifiziert werden, da sie von der horizontalen und der vertikalen Richtung abweichen. Für Wände wird angenommen, dass sie im Rahmen der Vorverarbeitung vertikal gestellt worden sind. Sie sind daher alle per Definition vertikal. Sind sie es nicht, werden sie als Dachflächen klassifiziert und dementsprechend behandelt. Im Weiteren wird von dem Gedanken ausgegangen, dass die Ausrichtung eines Gebäudes mittels einer oder mehrerer Hauptrichtungen beschrieben werden kann. Im Gegensatz zur Dachebene können die Wandflächen nämlich nicht lokal betrachtet werden, sondern es müssen aus allen vertikalen Wandflächen entsprechende Hauptrichtungen der Wände bestimmt und hinterher wieder mit den einzelnen Flächen verglichen werden. Da alle Wandflächen zur horizontalen Referenznormalen $n=(0,0,1)$ senkrecht stehen, kann die Bestimmung der Hauptorientierungen des Gebäudes durch Projektion in die Grundrissebene auf ein 2D Problem reduziert werden (siehe Abb. 6.11).

(DUCHÊNE et al. 2003) gibt einen Überblick über verschiedene Methoden, für die Automation der 2D Gebäudegeneralisierung die Orientierung eines 2D Gebäudegrundrisses zu bestimmen. Dabei wird deutlich, dass die meisten Verfahren auf eine bzw. auf zwei zueinander orthogonale Hauptrichtungen beschränkt sind. Die Hauptrichtungen der Objekte in Abbildung 6.12 können z.B. nicht damit bestimmt werden.

Ein Verfahren, welches die Bestimmung mehrerer Hauptrichtungen aus einer großen Zahl von Richtungen zulässt und zur Unterstützung der Extraktion von Straßennetzen aus Satellitenbildern zur automatischen kleinmaßstäblichen Kartierung konzipiert wurde, ist in (FABER 1997) und (FABER und FÖRSTNER 2000) beschrieben. Das Verfahren nutzt das Histogramm der Häufigkeiten der Richtungen. Es ist denkbar, dieses Verfahren für die

Bestimmung der Hauptrichtungen der Wandflächen eines Gebäudes zu übertragen. Neben der Häufigkeit der Richtungen sollten dabei außerdem die Kantenlängen bzw. die Flächengrößen, z.B. in Form einer Gewichtung, einfließen.

Sind die Hauptrichtungen bestimmt, werden die von den Hauptrichtungen abweichenden Wandflächen ähnlich wie bei der Dachebene aufgrund des Verhältnisses zu den benachbarten Wandflächen in Richtung einer der Hauptrichtungen rotiert. Als Taperkanten werden in diesem Fall die vertikalen Kanten der Flächen verwendet.

Eine praktische Umsetzung der Wandorthogonalisierung ist bisher nicht erfolgt. Für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Generalisierungsansatz wird davon ausgegangen, dass kleine Abweichungen durch eine Vorverarbeitung beseitigt wurden und dass keine störenden großen Abweichungen von 90° bzw. 180° vorliegen.

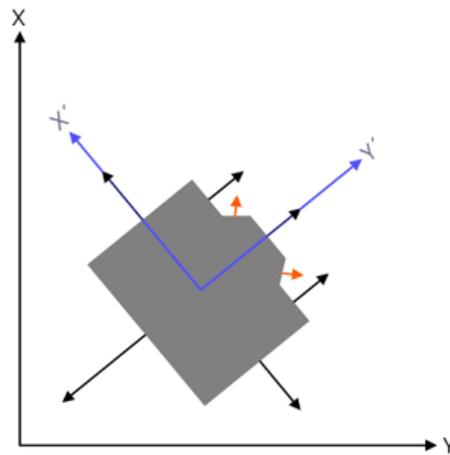


Abbildung 6.11: Im Grundriss: X, Y : Weltkoordinatensystem; X', Y' : Lokales Koordinatensystem, entspricht den beiden Hauptrichtungen; Schwarze Pfeile: Wandflächen parallel zu den Hauptrichtungen; Rote Pfeile: Wandflächen weichen von den Hauptrichtungen ab

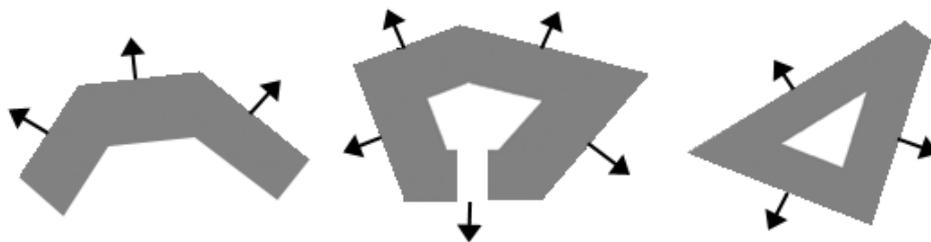


Abbildung 6.12: Gebäude mit mehr als 2 Hauptrichtungen

7 Experimente und Bewertung der Ergebnisse

Der in Kapitel 5 und 6 beschriebene Ansatz wird im Folgenden auf seine Eignung für die Generalisierung beispielhafter aber repräsentativer 3D Gebäudedaten untersucht. Die dazu erforderliche Software wurde mit Visual C++ und den durch ACIS bereitgestellten Klassen und Funktionen zur Analyse und Modifikation von 3D Objekten implementiert. Als Ausgangsdaten dienen BRep-Modelle (siehe Abschnitt 2.1.1), welche in Form von VRML-Objekten bereit gestellt oder mittels ACIS generiert wurden. Die VRML-Objekte werden automatisch konvertiert, sodass alle Ausgangsdaten als ACIS-Objekte in Sat-Dateien vorliegen und als solche analysiert und modifiziert werden können. Die bei der Umsetzung auftretenden Probleme haben die Entwicklung der Ansätze, vor allem der Parallelverschiebung, maßgeblich beeinflusst. Die Beschreibung der Experimente erfolgt im Wesentlichen in der selben Reihenfolge wie die Darstellung der Ansätze. D.h., mathematische Morphologie wird zunächst allein und dann in Kombination mit dem Krümmungsraum auf eine Auswahl von Testgebäuden angewandt. Die Parallelverschiebung und die Dachorthogonalisierung werden erst separat und dann in Kombination angewandt. Abschließend folgt eine Bewertung der Ergebnisse und ein Vergleich mit anderen Arbeiten zur 3D Gebäudegeneralisierung.

7.1 Mathematische Morphologie

Für die Umsetzung der mathematischen Morphologie wird in erster Linie die ACIS-Funktion 'api_offset_body' genutzt. Bei dieser werden alle Flächen eines Objekts (Body) gleichmäßig um einen frei wählbaren Betrag in eine einheitliche Richtung (+ oder -) in Bezug auf ihre Normalen bewegt. Für die automatische Gebäudevereinfachung mittels mathematischer Morphologie erfolgt die Bewegung iterativ. Für die Erosion werden alle Flächen schrittweise nach innen (-) und für die Dilatation schrittweise nach außen (+) bewegt. Hierbei muss die Anzahl der Iterationen und die Schrittgröße für die einzelne Iteration festgelegt werden. Parallele Strukturen werden bei der mathematischen Morphologie nur dann eliminiert oder aufgefüllt, wenn ihre Normalen entgegengesetzt ausgerichtet sind, die Flächen während einer Erosion oder Dilatation also aufeinander zu bewegt werden. Als Bewegungsweite reicht daher die Hälfte der Distanz zwischen zwei Flächen aus, um ein Maßstabsraumereignis bzw. eine Vereinfachung hervorzurufen. Die Zahl der Iterationen beträgt die maximale Bewegungsweite einer Fläche geteilt durch die Schrittgröße.

Für die Bestimmung der Schrittgröße spielt zunächst der Betrag der Toleranz der Software eine Rolle, da Flächen nur dann miteinander verschmelzen, wenn die Distanz zwischen ihnen unter diesem Betrag liegt. Die Toleranz, in ACIS SPAResabs (SPATIAL resolution absolute) genannt, beträgt bei ACIS 10^{-6} . Wird als Einheit Meter angenommen, so wären bei einer Struktur mit 0,5m Distanz zwischen den Flächen demnach mindestens 500000 Iterationen notwendig und der Generalisierungsprozess würde extrem langsam. Eine praktisch sinnvolle Schrittgröße ergibt sich daraus, dass das iterative Vorgehen nur notwendig ist, um zu vermeiden, dass mehrere Maßstabsraumereignisse lokal gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig negativ beeinflussen. Wird die erzielbare Messgenauigkeit (hier als 0,05m angenommen) berücksichtigt, so machen Schrittweiten unter dieser keinen Sinn. Die im Folgenden verwendeten Modelle sind generische Modelle, welche exakt auf volle oder halbe Meter genau modelliert sind und es wurde eine Schrittgröße von 0,05m gewählt. Für allgemeine Datensätze bieten sich zwei Vorgehensweisen an. Entweder werden die Abstände im Rahmen der Messgenauigkeit quantisiert und diese als Schrittgröße verwendet, oder es wird nach jedem Schritt geprüft, ob Flächen einen Abstand kleiner als die Schrittgröße haben, und diese Flächen werden um genau diese Distanz aufeinander zu bewegt und somit eine Verschmelzung oder Elimination erzwungen.

An dem Gebäude in Abbildung 7.1 werden beispielhaft Ergebnisse für wichtige Zwischenschritte eines Openings veranschaulicht. Die Flächen werden zunächst im Rahmen der Erosion in Schritten von 0,05m nach innen verschoben. Insgesamt werden 15 Iterationen ausgeführt, sodass parallele Strukturen unter 1,5m eliminiert werden, wobei die Bewegung jeder einzelnen Fläche 0,75m beträgt. Der Maßstabsparameter beschreibt im Folgenden den maßstabsdefinierenden Schwellwert, d.h. in diesem Fall die zu überbrückende Distanz zwischen zwei Flächen. Bei diesem Beispiel treten zwei Maßstabsraumereignisse auf, das erste nach fünf, das zweite nach zehn Iterationen. Durch das Verschmelzen von koplanaren Flächen werden nacheinander zwei kleinere Gebäudeteile (Anbauten) eliminiert. Durch die nach innen gerichtete Bewegung wird das Objekt deutlich kleiner. Daher wird beim Opening als zweiter Schritt eine Dilatation mit gleicher Iterationsanzahl und Schrittgröße durchgeführt, die das Objekt wieder auf die ursprünglichen Ausmaße, abzüglich der eliminierten Teile, zurücksetzt.

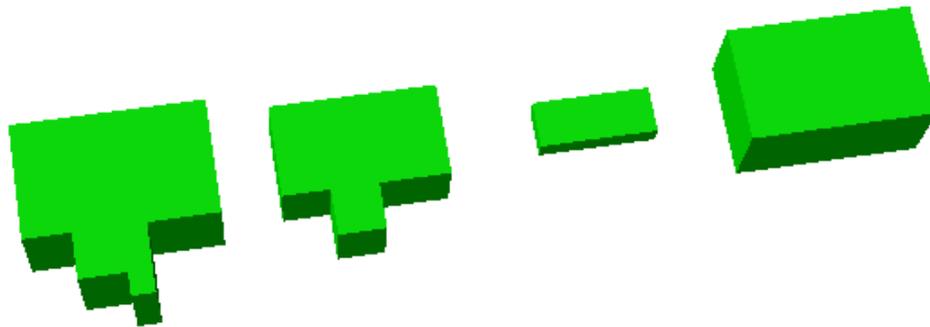


Abbildung 7.1: Opening mit einem Maßstabsparameter von 1,5m von links nach rechts: Original, Maßstabsraumereignis nach 5 Iterationen Erosion, Maßstabsraumereignis nach weiteren 10 Iterationen Erosion, Zurücksetzen durch Dilatation (15 Iterationen).

Abbildung 7.2 zeigt ohne die einzelnen Zwischenschritte von Erosion und Dilatation das Ergebnis eines Openings (Erosion–Dilatation) gefolgt von einem Closing (Dilatation–Erosion).

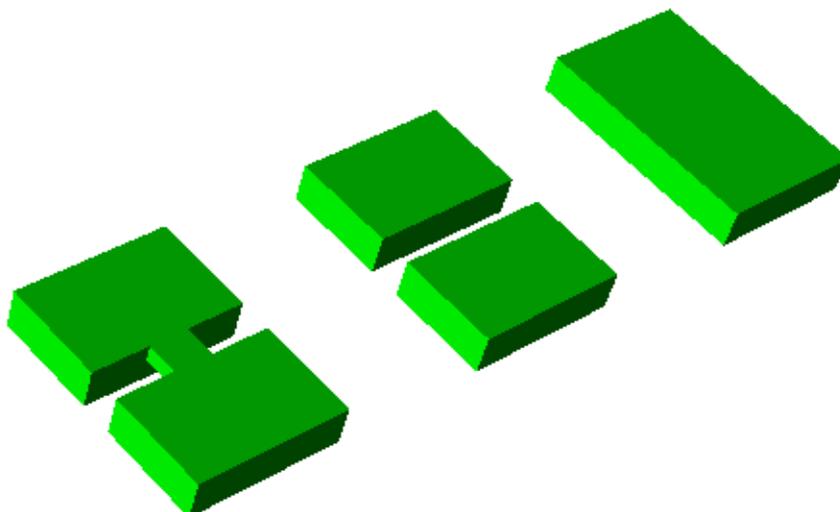


Abbildung 7.2: Opening gefolgt von Closing. Maßstabsparameter von links nach rechts: 2m, 4m

Beim Opening wird der Brückenteil zwischen zwei großen Gebäudeteilen eliminiert, beim Closing verschmelzen die Gebäudeteile zu einem Block. Die Brücke ist 2m dick und wird daher beim Opening nach 20 Iterationen eliminiert. Die Distanz zwischen den großen Blöcken beträgt 4m, für das Closing zum Schließen der Lücke werden also mindestens 40 Iterationen benötigt.

Ein weiteres Beispiel für das erfolgreiche Schließen von Lücken zwischen Gebäudeteilen ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Durch Closing wird zunächst die 1m breite Lücke geschlossen und in einem weiteren Schritt der 1,5m breite Innenhof aufgefüllt.

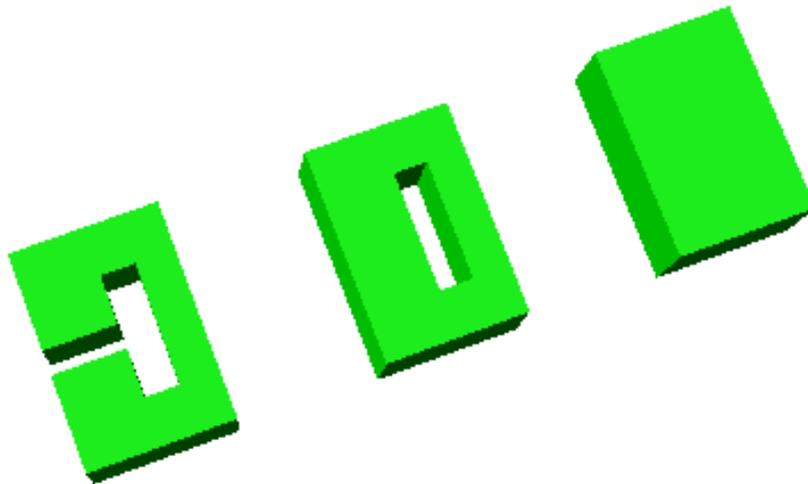


Abbildung 7.3: Doppeltes Closing. Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 1,5m

Abbildung 7.4 zeigt ein Gebäude mit einem 3m hohen Anbau und einem 4m hohen boxförmigen Eingangsbereich. Durch Erosion wird nur der Anbau eliminiert, da bei diesem die parallelen Flächen aufeinandertreffen. Die boxförmig angeordneten Flächen des Eingangsbereichs behalten ihre Relation zueinander bei und können daher nicht durch mathematische Morphologie behandelt werden.

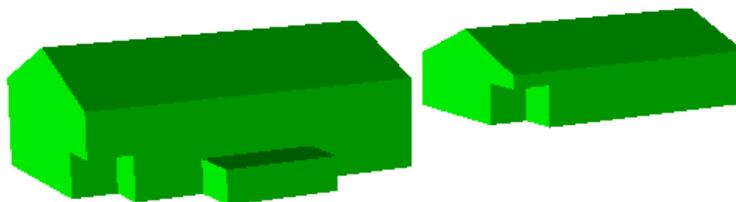


Abbildung 7.4: Erosion mit einem Maßstabsparameter von 3m. Der boxförmige Eingangsbereich bliebe auch mit größerer Bewegungsweite bestehen.

Die dargestellten drei Beispiele zeigen, dass mathematische Morphologie geeignet ist, parallele Flächen unter einer bestimmten Distanz zusammenfallen zu lassen, sodass das Objekt vereinfacht wird sowie Gebäudeteile oder Gebäude verschmolzen und einzelne Gebäude in Teile gespalten werden können. Soweit folgen die Ergebnisse der Experimente der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Theorie. Ein Problem, welches erst bei weiteren Tests deutlich

wurde, betrifft Strukturen, bei denen mehr als drei Kanten in einem Knoten zusammentreffen, d.h. bei denen Winkel zwischen Flächen auftreten, welche kein Vielfaches von 90° betragen. Abbildung 7.5 zeigt ein Gebäude, welches Knoten mit vier angrenzenden Kanten bzw. Flächen besitzt. Werden alle vier Flächen gleich weit in Richtung ihrer Normalen (oder dagegen) bewegt, ergibt sich kein gemeinsamer Schnittpunkt, sondern es kommt zu einer Aufspaltung des Knotens in zwei Knoten. Diese Aufspaltung wird durch das Zurücksetzen der Flächen im Rahmen des Opening bzw. Closing nicht rückgängig gemacht. Eine der wichtigsten Forderungen für Maßstabsräume ist die Kausalität. Es dürfen Objektteile wegfallen bzw. mit anderen Objektteilen zusammengefasst werden, aber es dürfen keine neuen Merkmale entstehen. Das Beispiel zeigt, dass die vorgestellte 3D Version der mathematischen Morphologie entsprechend der ihr zugrunde liegenden Annahmen nur für streng rechtwinklige bzw. parallele Strukturen als Maßstabsraum korrekte Ergebnisse erzeugt. Geneigte (Dach-) Strukturen führen hingegen zu nicht adäquaten Ergebnissen und damit zur Verletzung der Forderung nach Kausalität.

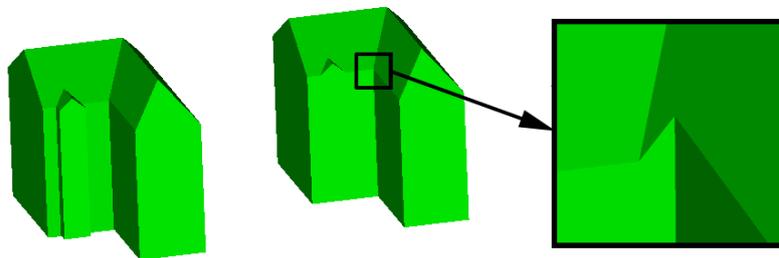


Abbildung 7.5: Grenzen vier Flächen an einen Knoten, so kommt es nach Anwendung der mathematischen Morphologie zur Aufspaltung in zwei Knoten.

Die Aufspaltung der Knoten bei Anwendung der mathematischen Morphologie auf Knoten mit mehr als drei angrenzenden nicht orthogonalen Flächen kann vermieden werden, indem die Bewegung der Flächen auf horizontale und vertikale Flächen beschränkt wird. Da nicht-orthogonale Strukturen im Vergleich zu orthogonalen Strukturen mit Hilfe der mathematischen Morphologie ohnehin nur sehr langsam eliminiert werden können und daher für diesen Zweck in jedem Fall eine andere Vorgehensweise gewählt werden sollte, stellt dies keine große Einschränkung dar. Werden nur zwei an einem 4er-Knoten liegende Flächen bewegt, findet zwar zunächst ebenfalls eine Aufspaltung des Knotens statt, durch das Zurücksetzen der Flächen im Rahmen des Opening oder Closing fallen beide Knoten aber wieder in einem Punkt zusammen und werden miteinander verschmolzen. Damit sind auch Gebäude mit geneigten Dachstrukturen handhabbar.

7.2 Krümmungsraum

Für die Umsetzung des Krümmungsraums wird vor allem die ACIS-Funktion 'api_offset_faces' genutzt. Im Gegensatz zu der für die mathematische Morphologie verwendeten Funktion 'api_offset_body' wird hier nur eine Auswahl spezifischer Flächen um eine vorgegebene Distanz bewegt. Für die Auswahl werden alle Flächen eines Objekts wie in Abschnitt 5.2 beschrieben analysiert. Um die Ergebnisse der Analyse zu veranschaulichen, werden den Flächen für die im Folgenden abgebildeten Beispiele je nach Klassifizierung verschiedene Farben zugeordnet. Es wird in Flächen konkaver Treppenstrukturen (grau), vollkommen konkaver Boxstrukturen (rot), konkaver Boxstrukturen, die weitere Boxstrukturen beinhalten (magenta) und konvexer Boxstrukturen (gelb) unterschieden (siehe z.B. Abb. 7.6). Alle konkaven Flächen werden in einer Liste gespeichert und bei der Krümmungsraumoperation iterativ nach außen bewegt. Die konvexen Flächen werden in einer separaten Liste gespeichert und iterativ nach innen bewegt.

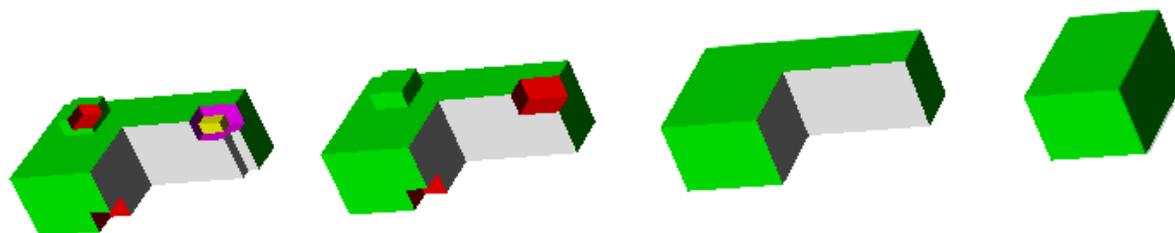


Abbildung 7.6: Klassifizierung der Flächen durch Farben hervorgehoben: konkave Treppenstruktur (grau), vollkommen konkave Boxstruktur (rot), konkave Boxstruktur, die weitere Boxstrukturen beinhalten (magenta) und konvexe Boxstruktur (gelb). Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 3m, 5m.

Die Bewegung der Flächen in Richtung auf eine parallele Fläche mit gleichgerichteter Normale erfolgt immer entlang der Kanten benachbarter, gleich klassifizierter Flächen. Deswegen reicht es, um die Bewegungsweite der Flächen für das nächste Maßstabsraumereignis zu ermitteln, die Länge der kürzesten Kante aller klassifizierten Flächen zu ermitteln, da diese auch die kürzeste Distanz zwischen den zwei Flächen beschreibt. Im Gegensatz zur mathematischen Morphologie, bei der aufgrund der gegenseitigen Verschiebung paralleler Flächen die halbe Distanz zwischen den Flächen als Bewegungsweite ausreicht, müssen die Flächen hier meist, d.h. wenn die spezifische Struktur einzeln betrachtet wird, über die gesamte Distanz bewegt werden. Beeinflussen sich die Strukturen gegenseitig, etwa bei einer konvexen Struktur, welche in eine konkave Struktur eingebettet ist (siehe Abb. 7.7), laufen Flächen unterschiedlicher Klassen gegeneinander und ein Maßstabsraumereignis tritt früher ein, als es die Betrachtung der einzelnen Strukturen erwarten lässt. Aus der Iterationsanzahl und dadurch aus der maximalen Bewegungsweite einer Fläche kann also nicht mehr direkt die überbrückte Flächendistanz abgeleitet werden.

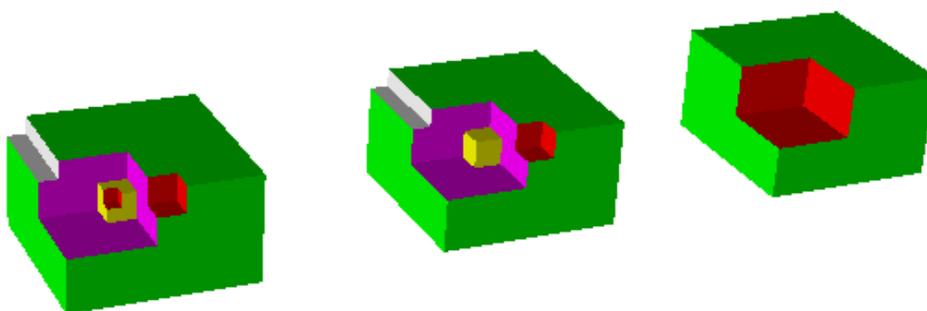


Abbildung 7.7: Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 3m. Die in die gelbe Box eingebettete rote Box ist 1,5m breit, wird aufgrund der Interaktionen zwischen den Strukturen aber bereits unter einem Schwellwert von 1m eliminiert.

Die Bewegung der Flächen ist beim Krümmungsraum darüber hinaus auch in Bezug auf die notwendigen Topologieänderungen kritischer als bei den Operationen der mathematischen Morphologie. Für Erosion und Dilatation muss die Zahl der Iterationen nicht der Zahl für ein bestimmtes Maßstabsraumereignis entsprechen, sondern kann auch darüber liegen, da unabhängig von der momentanen Flächenanzahl alle Flächen gleichmäßig bewegt werden. Reduziert sich zwischendurch die Zahl der Flächen durch die automatische Verschmelzung koplanarer Flächen, so ändert dies nichts am grundsätzlichen Vorgehen, da die verwendete ACIS-Funktion die

zu verschiebenden Flächen automatisch neu berechnet. Mehrere Maßstabsraumereignisse sind somit in einem Programmaufruf erreichbar und nur von dem gewählten Schwellwert abhängig.

Beim Krümmungsraum muss bei der verwendeten ACIS Funktion die für ein Maßstabsraumereignis notwendige Bewegungsweite dagegen exakt getroffen werden, da nur eine Liste ausgewählter Flächen bewegt wird, und der Inhalt dieser Liste sich nicht automatisch ändert. D.h., selbst wenn eine Fläche in einer Kante oder einem Punkt zusammenfällt, wird sie bei weiterer Verwendung der Liste weiter verschoben, d.h. sie wird über ihr Ziel hinaus bewegt. Aus einer konkaven Struktur kann eine nicht mannigfaltige Struktur entstehen (siehe Abb. 7.8). Um diesen Effekt zu verhindern, erfolgt nach jeder Iteration eine Analyse des Objekts.

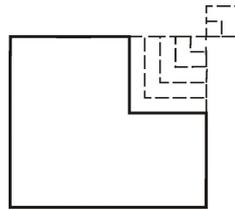


Abbildung 7.8: Wird nach der Verschmelzung zweier Flächen keine neue Liste für die zu bewegenden Flächen erstellt, werden bereits eliminierte Flächen weiterhin bewegt und es kann ein nicht mannigfaltiges Objekt entstehen.

Die Abbildungen 7.6, 7.7, 7.9, 7.10 und 7.11 zeigen Ergebnisse für die sequenzielle Anwendung von mathematischer Morphologie und Krümmungsraum. Die Klassifizierung und damit die Flächenfarben wurden nach jedem Schritt neu berechnet bzw. zugewiesen und verdeutlichen so die nachfolgenden Flächenbewegungen für die Krümmungsraumoperationen. Die angegebenen Maßstabsparameter beschreiben die jeweiligen Schwellwerte für die Distanzen zwischen den Flächen, welche mit dem gewählten Verfahren überbrückt werden sollen. Die Anzahl der Iterationen beträgt für den Krümmungsraum die zu überbrückende Distanz geteilt durch die Schrittgröße, während für die Operationen der mathematischen Morphologie die halbe Iterationszahl ausreicht. Die Schrittgröße beträgt 0,05m.

In den Abbildungen 7.6 und 7.7 sind Beispiele für die Interaktionen zwischen den zu verschiebenden Flächen, wenn konvexe Boxen (gelbe) in konkave Boxen (magenta) eingebettet sind, dargestellt. Trotz der schnelleren Elimination dieser Strukturen sind die Ergebnisse (optisch) zufriedenstellend. Abbildung 7.9 zeigt ein komplexes Gebäude mit Balkonen, Anbauten, Aufsätzen und Einsprünge. Je nach Schwellwert werden kleine Objektteile eliminiert und Einsprünge aufgefüllt.

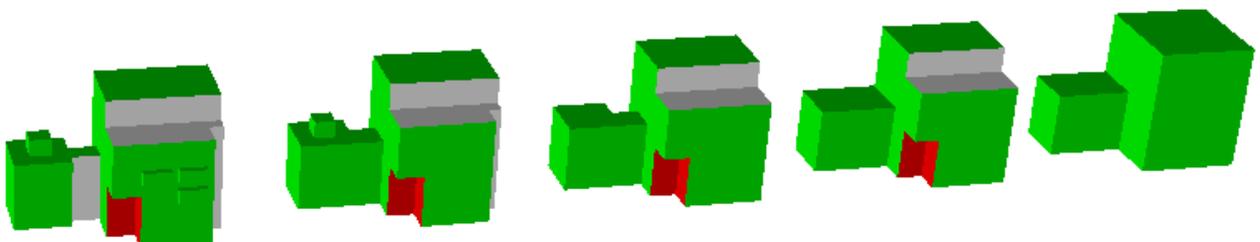


Abbildung 7.9: Maßstabsparameter von links nach rechts: 2m, 3m, 3,5m, 4m

In Abbildung 7.10 wird das Gebäude durch die Generalisierung insgesamt höher. Ursache hierfür ist die Klassifizierung der großen Dachfläche. Aufgrund der besonderen Form des Aufsatzes wird sie als konkave Box angesehen

und nach außen bewegt. Da das Dach des Aufsatzes nicht für eine Bewegung ausgewählt wurde, bewegt sich die große Fläche auf die kleine zu, d.h. das Gebäude passt sich in der Höhe der kleinen statt der großen Fläche an. D.h., die Größenverhältnisse zwischen den zu verschmelzenden parallelen Flächen werden bei dieser Implementierung des Krümmungsraums nicht berücksichtigt.

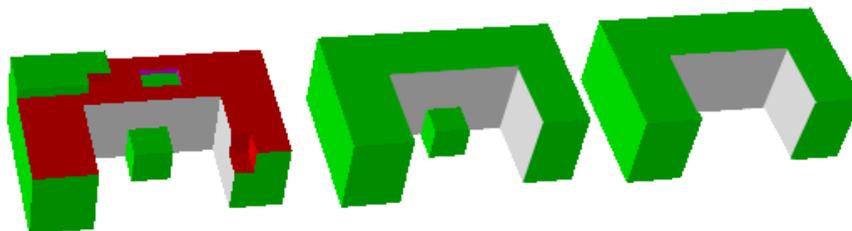


Abbildung 7.10: Maßstabsparameter von links nach rechts: 4m, 5m. Die Höhe des generalisierten Gebäudes passt sich der kleinen statt der großen Dachfläche an.

Abbildung 7.11 zeigt das in Abbildung 7.1 mit mathematischer Morphologie vereinfachte Gebäude, diesmal mit den Operationen des Krümmungsraums kombiniert. Im Gegensatz zu der reinen Anwendung der mathematischen Morphologie greift hier im zweiten Schritt (Maßstabsparameter 1m) der Krümmungsraum. Statt der Elimination des Anbaus erfolgt ein Auffüllen der konkaven Treppenstrukturen.

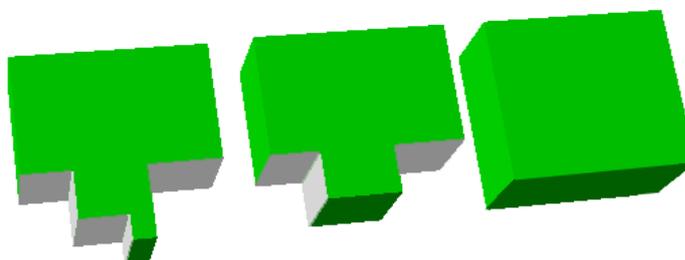


Abbildung 7.11: Maßstabsparameter von links nach rechts: 0,5m, 1m.

7.3 Parallelverschiebung

Für die Umsetzung der Parallelverschiebung wird die ACIS-Funktion 'api_offset_faces_specific' genutzt, bei der für einzelne Flächen individuelle Bewegungsweiten gewählt werden können. Praktisch werden bei der Parallelverschiebung immer nur zwei Flächen gleichzeitig bewegt. Die Bewegung der Flächen erfolgt nicht wie bei mathematischer Morphologie und Krümmungsraum für alle zu verschiebenden Flächen gleichzeitig und iterativ in kleinen Schritten, sondern jeweils pro Flächenpaar in einem einzigen Bewegungsschritt. Zunächst wird aus allen parallelen Flächenpaaren das Paar mit der kleinsten Distanz ermittelt. Liegt diese unter dem vorgegebenen Schwellwert, werden die beiden Flächen so aufeinander zu bewegt, dass sie sich in einer Ebene treffen. Dadurch entsteht eine Vereinfachung in Form einer Verschmelzung, Aufspaltung, Elimination oder Glättung einer lokalen Struktur. Hat die Vereinfachung stattgefunden, wird innerhalb der verbleibenden parallelen Flächenpaare wieder nach der kleinsten parallelen Distanz gesucht. Dies wird solange wiederholt, bis die kleinste Distanz

zweier Flächen über dem Schwellwert liegt. Iteriert wird hier über die Flächenpaare, nicht über die Bewegungsschritte. Da sich die Berechnungen also auf Mengen paralleler Flächen beschränken, deren Zahl sich durch die Maßstabsraumereignisse nur verringern kann, kann die Komplexität des Ansatzes niedrig gehalten werden.

Für die Distanzen der Flächenbewegung sind, wie in Abschnitt 5.3 erläutert wurde, unterschiedliche Gewichtungen möglich. Im Weiteren werden je nach Größenverhältnis der Flächen zwei Fälle unterschieden: Ist eine der Flächen kleiner als ein Drittel der anderen Fläche, wird nur die kleinere Fläche über die komplette Distanz bewegt. Ansonsten werden beide Flächen über die halbe Strecke bewegt. Die Wahl dieser Gewichtung erfolgte intuitiv und damit willkürlich, resultiert aber in zufriedenstellenden Ergebnissen für eine größere Zahl an Beispielen.

Der Maßstabsparameter steht direkt für die zu überbrückende Distanz zwischen zwei parallelen Flächen. Für die Wahl eines parallelen Flächenpaares ist es egal, wie diese ausgerichtet sind, d.h. ob die Normalen aufeinander zu, voneinander weg oder in die gleiche Richtung zeigen. Der Ansatz ist dadurch allgemeiner und einfacher als die Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum.

Die in den Abbildungen 7.12, 7.13, 7.14 und 7.15 dargestellten Generalisierungsergebnisse erfüllen die subjektiven Erwartungen an eine erfolgreiche 3D Generalisierung. Die ersten drei Testgebäude wurden bereits durch mathematische Morphologie und Krümmungsraum vereinfacht (siehe Abb. 7.2, 7.7 und 7.9). Die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren sind vergleichbar. Der Vorteil der Parallelverschiebung gegenüber der Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum besteht in der Schnelligkeit des Ablaufs. Während die Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum für die Vereinfachung eines einzelnen Gebäudes einige Minuten benötigt, ist das Ergebnis der Parallelverschiebung bei gleicher Hard- und Software in wenigen Sekunden berechnet.

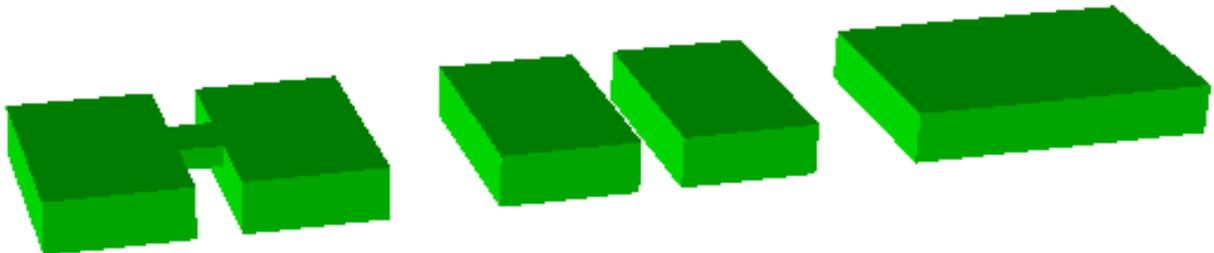


Abbildung 7.12: Aufspaltung und anschließende Wiedervereinigung. Maßstabsparameter von links nach rechts: 2m, 4m

Unter kartographischen Gesichtspunkten ist die Aufspaltung eines Objekts in zwei Objekte, wie sie in Abbildung 7.12 bzw. Abbildung 7.2 gezeigt wird, nicht unproblematisch. Unabhängig von dem gewählten Vereinfachungsverfahren müssten zusätzliche Bedingungen einfließen, welche festlegen, ob bzw. wann eine Aufspaltung sinnvoll ist.

In den Abbildungen 7.16 und 7.17 sind Gebäude dargestellt, welche ebenfalls bereits mit einer Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum vereinfacht wurden (siehe Abb. 7.6 und 7.10). In beiden Fällen sind die Ergebnisse für die unterschiedlichen Verfahren zwar nicht identisch, könnten so aber auch aus einer manuellen Vereinfachung hervorgegangen sein. Beim Übergang zu einem Quader im größten Maßstab werden allerdings Objektteile entfernt, welche subjektiv als wichtig empfunden werden. Ein Auffüllen der Gebäude wäre in beiden Fällen trotz größerer Volumenänderung intuitiver.

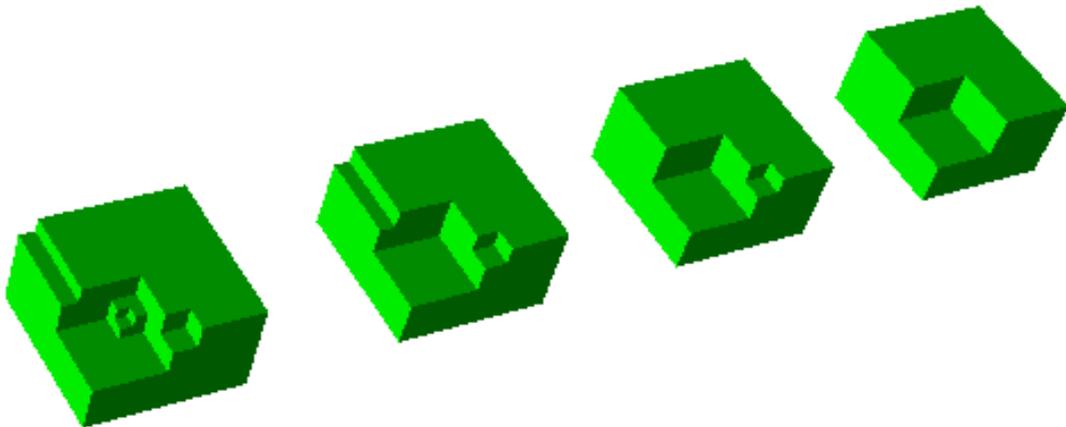


Abbildung 7.13: Maßstabsparameter von links nach rechts: 1,5m, 2m, 2,5m

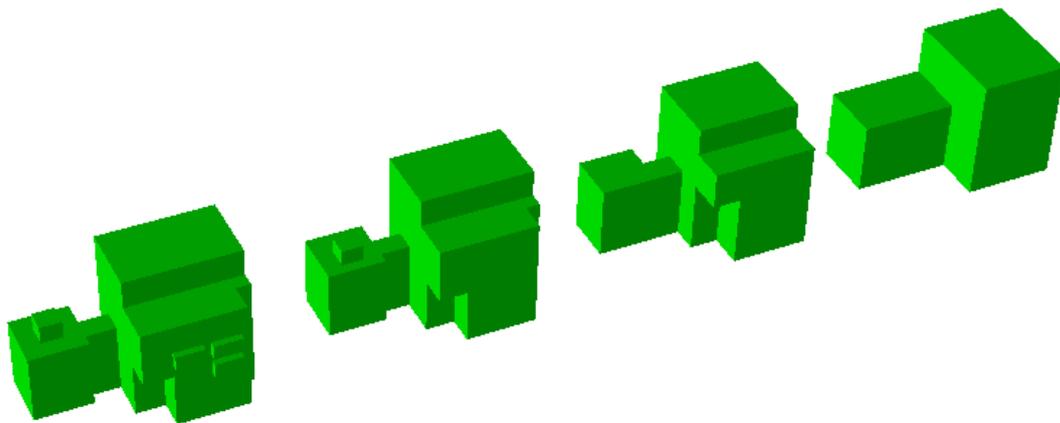


Abbildung 7.14: Maßstabsparameter von links nach rechts: 1,5m, 3m, 4,5m

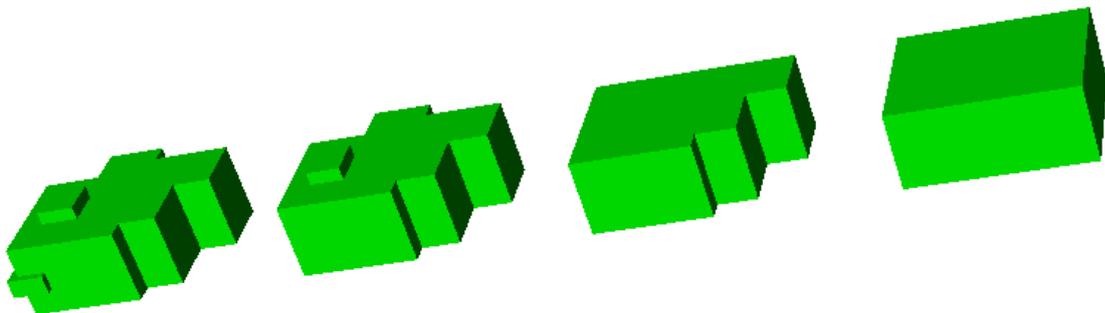


Abbildung 7.15: Maßstabsparameter von links nach rechts: 0,5m, 1m, 2m



Abbildung 7.16: Ein Auffüllen des Gebäudes im letzten Vereinfachungsschritt wäre intuitiver als das Wegfallen des Gebäudeflügels. Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 3m, 5m

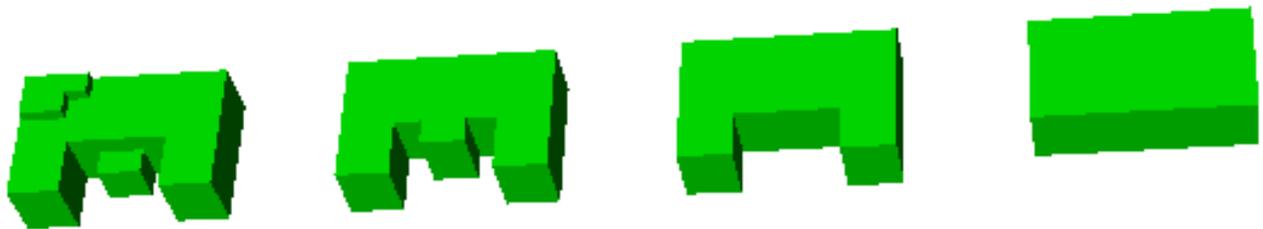


Abbildung 7.17: Ein Auffüllen des Gebäudes im letzten Vereinfachungsschritt wäre intuitiver als das Wegfallen der Gebäudeteile. Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 1,5m, 3m

Abbildung 7.18 zeigt mehrere Objekte, die gleichzeitig und mit den gleichen Maßstabsparametern vereinfacht wurden. Im dritten Beispiel von links wird ein entscheidender Vorteil der Parallelverschiebung deutlich. Vom zweiten zum dritten Maßstab findet eine Formbereinigung statt. Kleine Objektteile werden also nicht zwingend eliminiert, sondern können geglättet werden. Bei dem Beispiel ganz rechts ist das gleiche Problem erkennbar, welches sich auch schon in den vorhergehenden Beispielen abzeichnete: statt eine große Lücke aufzufüllen, wie es intuitiv vorzuziehen wäre, fallen zwei Objektteile mit geringerer Ausdehnung weg.

Weitere Beispiele für die Glättung von Strukturen sind in Abbildung 7.19 und 7.20 dargestellt. Letzteres Beispiel zeigt ein prismatisches Gebäude (siehe Abschnitt 2.1.1). Eine Glättung ist nur bei exakt parallelen Strukturen möglich. Kleine Ecken, welche nicht aus parallelen Strukturen gebildet werden, bleiben daher bestehen.

In Abbildung 7.21 wirkt das Ergebnis des ersten Vereinfachungsschritts durch Parallelverschiebung plausibel, der zweite Schritt ändert allerdings den optischen Schwerpunkt des Gebäudes. Im Ausgangsmodell liegt dieser eher rechts, bei der zweiten Vereinfachung wird er nach links verschoben. Dies liegt daran, dass die Reihenfolge der Flächenbewegungen nur von der Größe der Distanzen zwischen parallelen Flächen abhängt. Subjektive optische Schwerpunkte oder Symmetrien, welche eine manuelle Vereinfachung beeinflussen, werden bei der automatischen Vereinfachung durch Parallelverschiebung nicht berücksichtigt. Für diesen Fall liefern die Anwendung von reiner mathematischer Morphologie (siehe Abb. 7.1) und die Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum (siehe Abb. 7.11) bessere Ergebnisse.

Abbildung 7.22 zeigt ein komplexes Gebäude, welches schrittweise vereinfacht wird. Weiter als bis zum letzten hier gezeigten Maßstab kann allerdings nicht vereinfacht werden, da bei gegenseitiger Verschiebung der Flächen mit der kleinsten Distanz ein nicht mannigfaltiges Objekt (siehe Abschnitt 2.1.2) entstehen würde (siehe Abb. 7.23). Dies wird durch ACIS unterbunden, indem die Bewegungen der Flächen nicht ausgeführt werden und der Prozess an dieser Stelle abbricht.

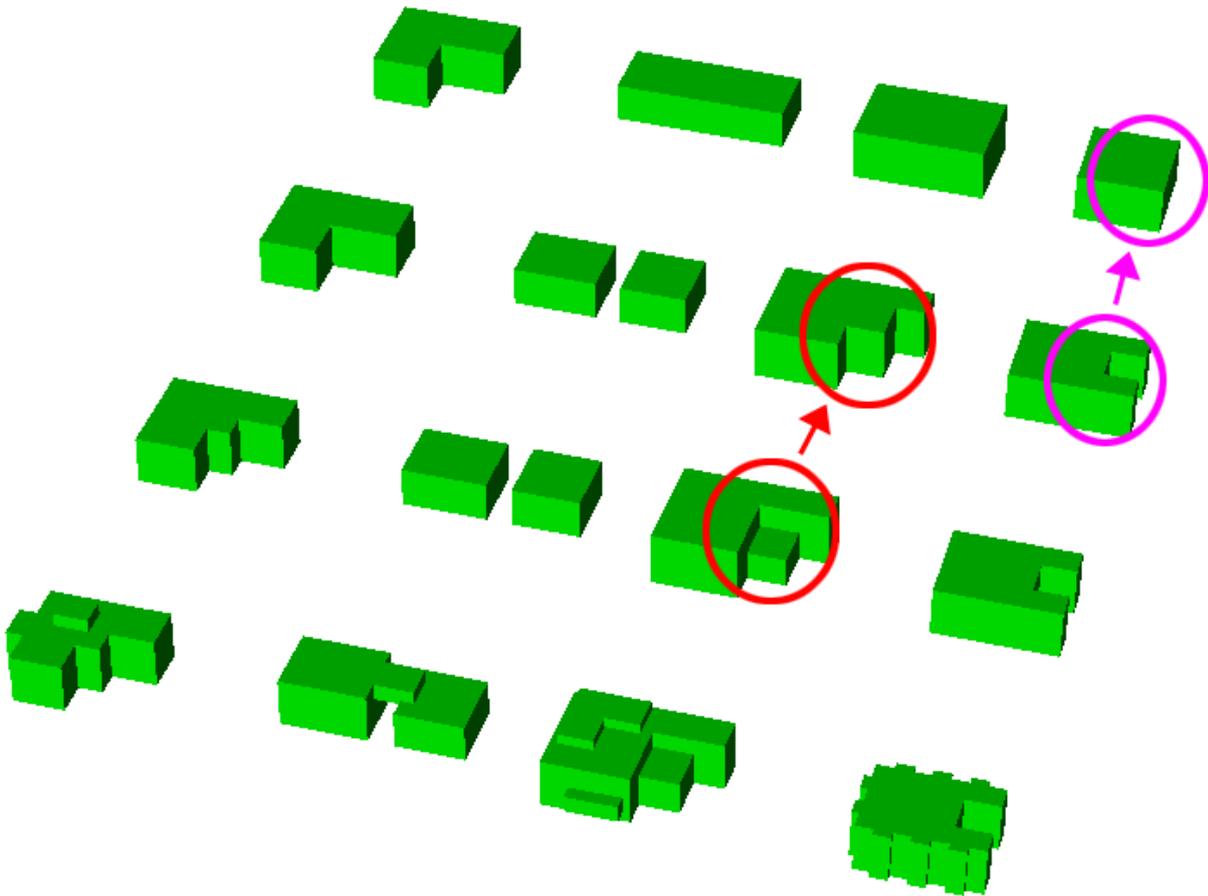


Abbildung 7.18: Rote Markierung: Objektteile werden nicht eliminiert, sondern ausgeglichen bzw. geglättet; magentafarbene Markierung: Ein Auffüllen der Lücke wäre intuitiver als das Wegfallen der Teile. Maßstabsparameter von unten nach oben: 1m, 1,5m, 2m

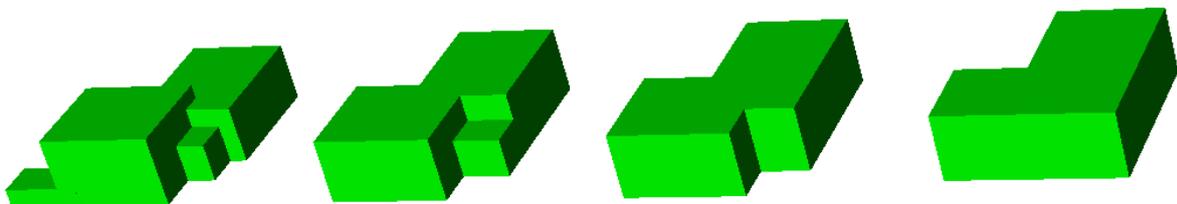


Abbildung 7.19: Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 2m, 3m



Abbildung 7.20: Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 2m, 3m

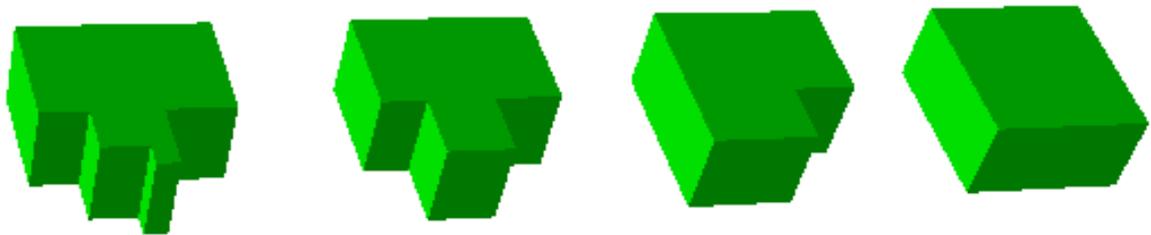


Abbildung 7.21: Der optische Schwerpunkt wird beim zweiten Vereinfachungsschritt verschoben. Maßstabsparameter von links nach rechts: 0,5m, 1m, 1,5m

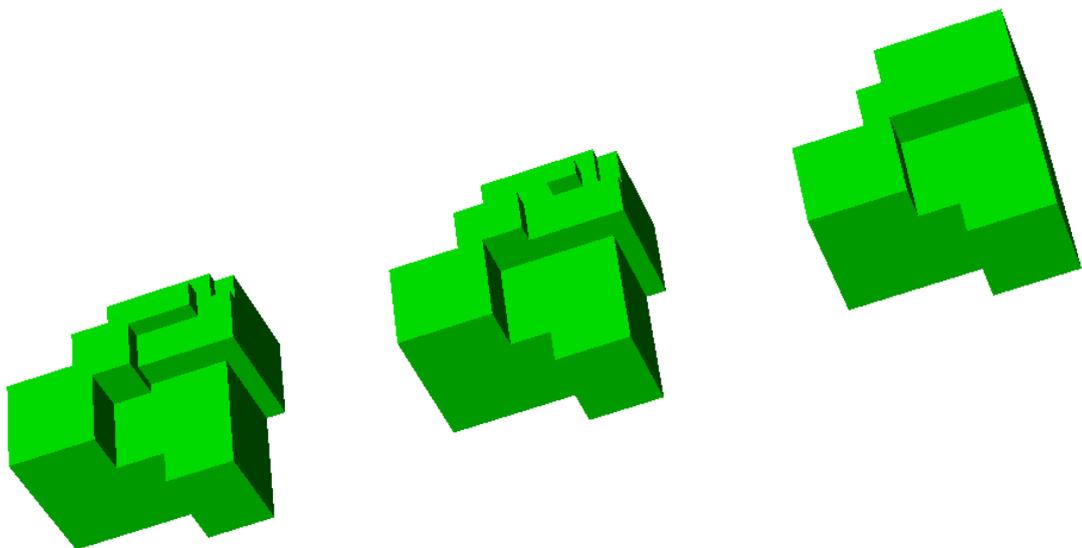


Abbildung 7.22: Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 5m, 10m

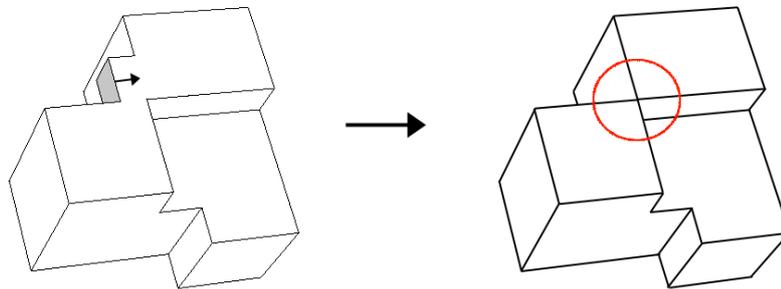


Abbildung 7.23: Das Gebäude (links) kann nicht weiter vereinfacht werden, da im nächsten Schritt eine Kante mit mehr als zwei angrenzenden Flächen entstehen würde (siehe rote Markierung). Die Entstehung eines solchen nicht mannigfaltigen Objekts wird durch die ACIS-Funktion verhindert und der Prozess bricht ab.

Die Abbildungen 7.24 und 7.25 zeigen ähnliche Gebäude, die aber völlig unterschiedlich vereinfacht werden. Da immer nur die Flächenpaare mit der kleinsten Distanz gegeneinander verschoben werden, können sehr kleine Distanzunterschiede zu absolut unterschiedlichen Ergebnissen führen (siehe auch Abb. 7.26). In Abbildung 7.24 erfolgt im ersten Schritt nur eine Angleichung, keine Polygonreduktion. In den folgenden Schritten wird aufgrund günstiger Distanzverteilung die Symmetrie des Objekts beibehalten, indem die Lücken zwischen den Gebäudeteilen geschlossen werden. Die subjektive Symmetrie in Abbildung 7.25 wird dagegen nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse können selbst bei Flächenpaaren mit exakt gleicher Distanz aufgrund der zufälligen Wahl des zuerst zu bewegenden Paares voneinander abweichen.



Abbildung 7.24: Symmetrie wird beibehalten. Maßstabsparameter von links nach rechts: 0,5m, 0,9m, 1,3m

Um auch Eigenschaften von Gebäuden, wie ihre Symmetrie, bei der Generalisierung berücksichtigen zu können, war zunächst eine gleichzeitige Bewegung von mehr als zwei Flächen angedacht. Da dadurch aber u.U. eine Fläche in Bezug auf mehrere zu ihr parallele Flächen verschoben werden muss, kommt es zu Interaktionen zwischen den Flächen, die oft nicht einfach vorhersagbar sind und die sogar eine Vereinfachung verhindern können. Hat eine Fläche z.B. zwei parallele Flächen in gleichem Abstand, aber in entgegengesetzten Richtungen, würde die Fläche nicht mehr bewegt werden. Bei der symmetrischen Struktur in Abbildung 7.27 sind die aus diesem Grund bewegungslosen Flächen durch rote Pfeile markiert. Werden nur die mit schwarzen Pfeilen markierten Flächen



Abbildung 7.25: Symmetrie geht verloren. Maßstabsparameter von links nach rechts: 1m, 1,5m, 2m

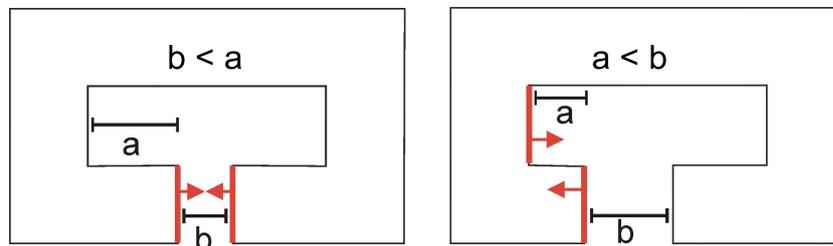


Abbildung 7.26: Kleine Distanzunterschiede können zu deutlichen Abweichungen bei der Vereinfachung führen. Rote Pfeile: Gewählte Flächenbewegung.

bewegt, wird das Objekt entweder bei Bewegung über die halbe Distanz dünner oder es würde bei ganzer Distanz vollkommen eliminiert werden, wenn die ACIS-Funktion dies nicht verhindern würde. Die Vereinfachung schlägt fehl. Bei der zufälligen Auswahl einzelner Flächenpaare, wie es der vorgestellte Ansatz vorschlägt, ist immerhin eine Vereinfachung garantiert, auch wenn diese teilweise unter Verlust der Symmetrie erfolgt.

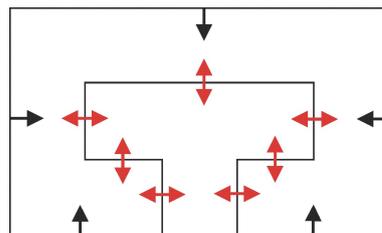


Abbildung 7.27: Die gleichzeitige Bewegung aller Flächen in Bezug auf alle zu ihnen parallelen Flächen kann zur Hemmung der Bewegung einzelner für die Generalisierung relevanter Flächen führen. Die rot markierten Bewegungen hemmen sich gegenseitig. Nur die schwarz markierten Bewegungen können ausgeführt werden.

7.4 Dachorthogonalisierung

Die ursprüngliche Idee für die Dachorthogonalisierung greift die von MAYER (1998b) formulierte Idee auf, Flächen iterativ zu rotieren, bis rechteckige Strukturen entstehen (siehe Abschnitt 4.2.3). Konkret werden alle Dachflächen gleichzeitig und iterativ in kleinen Winkelschritten um ihre Traufen rotiert (siehe Abb. 6.3). Das

Rotieren einer Fläche um eine ihrer Kanten wird in ACIS als Tapering bezeichnet. Für einfache Dachformen, wie z.B. Satteldachgebäude mit rechteckigem Grundriss, funktioniert dies gut. Probleme treten für komplexere Dachtypen, d.h. Kombinationen aus verschiedenen Dachtypen bzw. Dachneigungen, auf. Haben die gleichzeitig rotierten Flächen unterschiedliche Winkel zur Horizontalen, resultiert das Verfahren in unterschiedlichen Firsthöhen, wo ursprünglich eine gemeinsame Firsthöhe bestand, und damit in der Entstehung neuer Kanten (siehe Abb. 7.28).

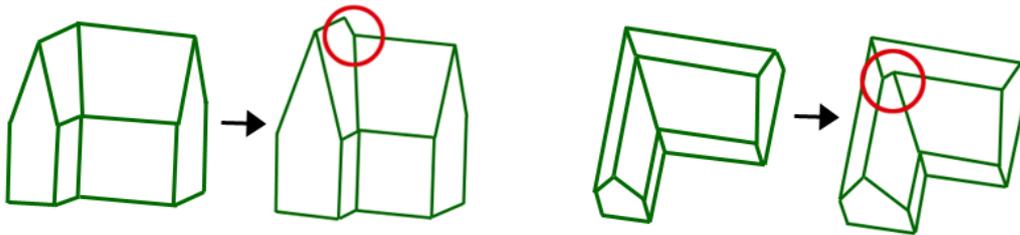


Abbildung 7.28: Problem bei inkrementellem Tapering: Unterschiedliche Neigungswinkel führen zu unterschiedlichen Firsthöhen nach Iterationsschritt. Dabei entstehen neue Kanten (rot eingekreist).

Dieses Problem führte zu der in (FORBERG und MAYER 2003) vorgestellten Überlegung, statt der Winkel die Firsthöhe zu verändern, indem die Kante, welche dem First entspricht, nach unten verschoben wird (siehe Abb. 7.29).

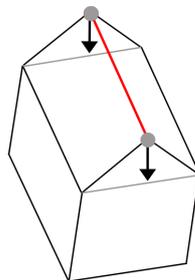


Abbildung 7.29: Verschieben der Firstkante zur Erzeugung eines Flachdachs

Diese Idee war technisch nicht realisierbar, da die Verschiebung von Kanten oder Knoten in ACIS zwar möglich ist, dabei auftretende Topologieänderungen allerdings nicht berücksichtigt werden. Dies führt zu dem in Abbildung 7.30 dargestellten Effekt. Die Flächen werden zwar rotiert, verschmelzen aber nicht miteinander.

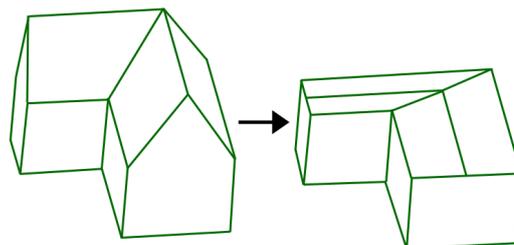


Abbildung 7.30: Keine automatische Topologieänderung in ACIS nach Verschieben der Firstkante

Aufgrund dieser Erkenntnis erfolgte eine Rückbesinnung auf das auf Tapering basierende Verfahren, was zur Entwicklung des in Abschnitt 6.1 beschriebenen Ansatzes führte. Um die Probleme, die bei einer inkrementellen Rotation in kleinen Winkelschritten auftreten, zu umgehen, werden hierbei die Flächen in einem oder wenig mehr Schritten (siehe dazu Abb. 6.6 und 6.7) horizontal oder vertikal gestellt. Hierfür wird die ACIS Funktion 'api_edge_taper_faces' verwendet. Die Wahl der Kante, um die eine Fläche rotiert wird, und die angestrebte Lage der Fläche wird, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, aufgrund der Relationen zu benachbarten Flächen getroffen. Die Abbildungen 7.31, 7.32, 7.33 und 7.34 zeigen Ergebnisse für diesen Ansatz. Aufgrund des komplexeren Schattenwurfs von geneigten Flächen sind die Beispiele im Weiteren zur besseren Interpretierbarkeit als Drahtgittermodelle abgebildet.

Abbildung 7.31 zeigt ein L-förmiges Gebäude mit geneigtem Dach und einer kleinen Satteldachstruktur, welche in die große Dachstruktur eingebettet ist. Die unterschiedlichen Dacheinheiten, charakterisiert durch verbundene Firstkanten, werden korrekt erkannt und im jeweilig passenden Maßstab orthogonalisiert. Der Maßstabsparameter beschreibt hier, wie auch im Folgenden, den Schwellwert für die mittlere Flächengröße einer Dacheinheit.

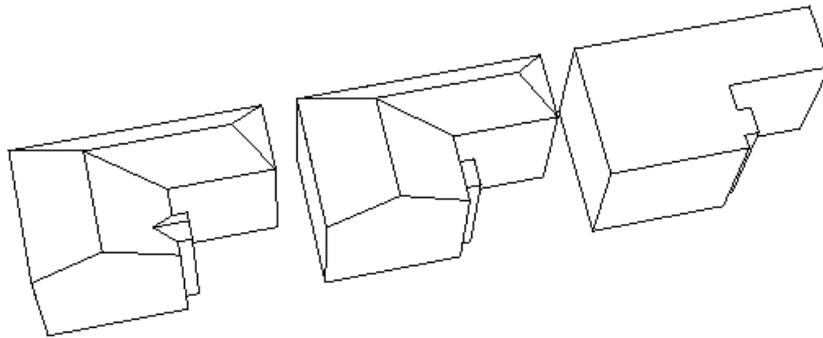


Abbildung 7.31: Erkennung der verschiedenen Dacheinheiten und separate Orthogonalisierung der zugehörigen Dachflächen. Maßstabsparameter von links nach rechts: $20m^2$, $400m^2$

In Abbildung 7.32 wird zunächst das Keildach des Anbaus orthogonalisiert. Im größeren Maßstab wird schließlich auch das Satteldach des Hauptgebäudes auf ein Flachdach reduziert.

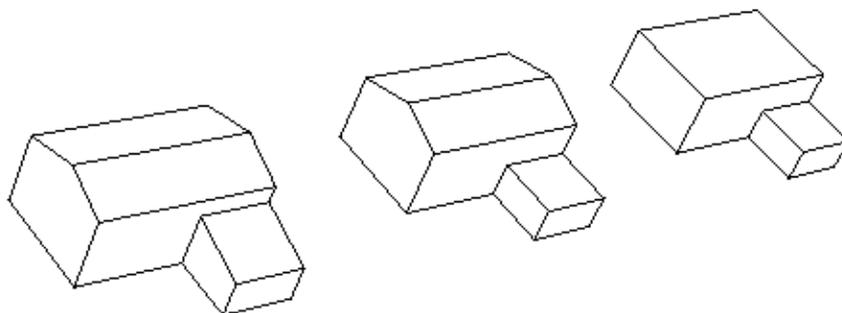


Abbildung 7.32: Unterscheidung der verschiedenen Dacheinheiten und separate Orthogonalisierung der zugehörigen Dachflächen. Maßstabsparameter von links nach rechts: $4m^2$, $16m^2$

Abbildung 7.33 zeigt ein einfaches Satteldachgebäude mit einer Gaube. Die Gaube wird zwar korrekt orthogonalisiert, dabei aber nicht eliminiert.

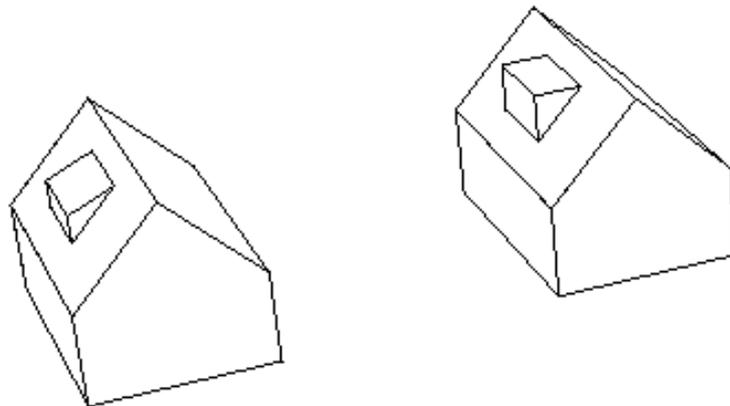


Abbildung 7.33: Die Gaube wird orthogonalisiert, aber nicht eliminiert. Maßstabsparameter: $5m^2$

Für die in Abbildung 7.34 dargestellten Ergebnisse wurde die Dachorthogonalisierung für mehrere Gebäude gleichzeitig und mit gleichen Maßstabsparametern ausgeführt. Die Abbildung zeigt, dass auch komplexe Kombinationen verschiedener Dachtypen mit dem Ansatz erfolgreich orthogonalisierbar sind. Da die Flächen z.T. um den First, z.T. um die Traufe rotiert werden, ist die resultierende Höhe der Gebäude allerdings nicht einheitlich, sondern entspricht z.T. der Firsthöhe und z.T. der Traufenhöhe des Ausgangsmodells. Somit ist eine nachträgliche Skalierung der Höhe je nach Nutzerwunsch notwendig. Der Nutzer sollte entscheiden, ob Firsthöhe, Traufenhöhe oder eine aus beiden gemittelte Höhe für das vereinfachte Modell verwendet werden sollte. Die Wahl hängt vor allem von der Anwendung des 3D Modells ab, d.h. davon, ob das Modell für eine Visualisierung oder für eine Simulation, z.B. für die Berechnung von Wellenausbreitungen, gedacht ist.

Schwierig wird die Skalierung besonders dann, wenn lokale Dachstrukturen orthogonalisiert werden müssen und damit nur lokale Bereiche des Gebäudes skaliert werden müssen. Zu erkennen, welche lokalen Strukturen eine Höhenskalierung erfahren müssen, ist nicht trivial und z.T. anwendungsabhängig. So besteht für das in Abbildung 7.35 im Querschnitt skizzierte Gebäude zunächst die Frage, ob das Dach überhaupt skaliert werden soll. Ist dies der Fall, so kann es nach der Orthogonalisierung auf die Firsthöhe oder die mittlere Höhe skaliert werden. Hierzu muss die aus der Orthogonalisierung resultierende einheitliche Flachdachfläche wieder gespalten werden. Aufgrund der aufgezeigten Probleme wurde auf die Höhenskalierung in dieser Arbeit verzichtet.

In Abbildung 7.36 ist ein weiteres Problem der Dachorthogonalisierung zu sehen. Besitzt eine geneigte Fläche mehrere vorhergehende oder nachfolgende Flächen, so können die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Kombinationen zu unterschiedlicher Auswahl von Taperkante und -richtung führen. Damit ist eine Orthogonalisierung mit dem vorgestellten Ansatz ohne Erweiterung nicht möglich.

7.5 Kombination von Parallelverschiebung und Dachorthogonalisierung

Im Folgenden werden Ergebnisse für die Kombination von Dachorthogonalisierung und Parallelverschiebung dargestellt. Die angegebenen Maßstabsparameter bestehen für jeden Vereinfachungsschritt aus der erwünschten minimalen durchschnittlichen Flächengröße einer Dacheinheit, gefolgt von der Distanz, welche die parallelen Flächen nach der Parallelverschiebung mindestens haben sollen. Die Wahl der zwei Parameter erfolgte für jedes

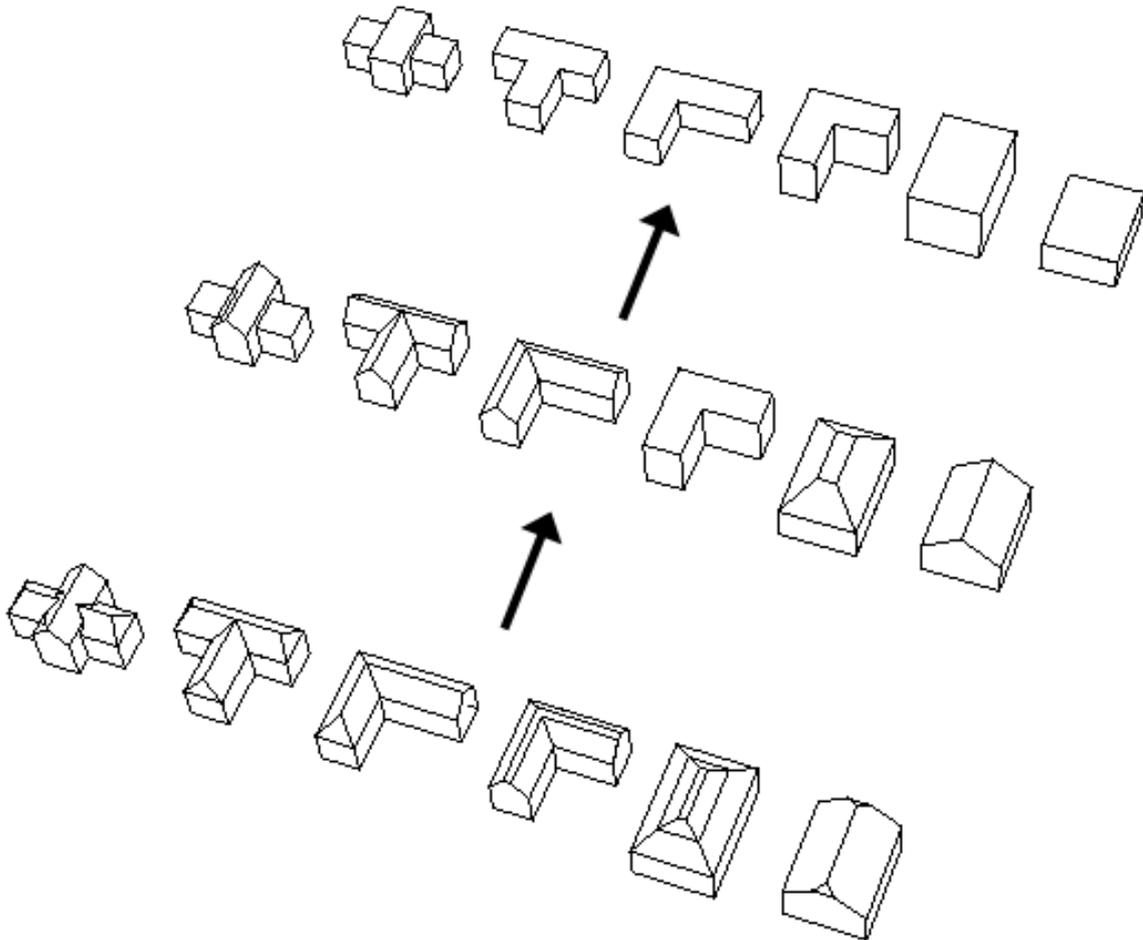


Abbildung 7.34: Auch Kombinationen unterschiedlicher Dachstrukturen werden orthogonalisiert. Die resultierende Gebäudehöhe ist nicht einheitlich. Deswegen ist für viele Anwendungen eine zusätzliche Skalierung auf die Traufenhöhe, Firsthöhe oder die mittlere Höhe sinnvoll. Maßstabsparameter von unten nach oben: $7m^2$, $25m^2$

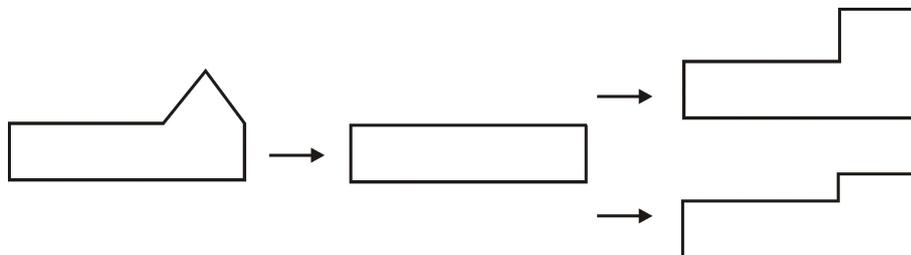


Abbildung 7.35: Von Links nach Rechts: Gebäude mit lokaler Dachstruktur, Gebäude nach Dachorthogonalisierung, Höhenskalierung auf die Firsthöhe (oben) oder die mittlere Höhe (unten)

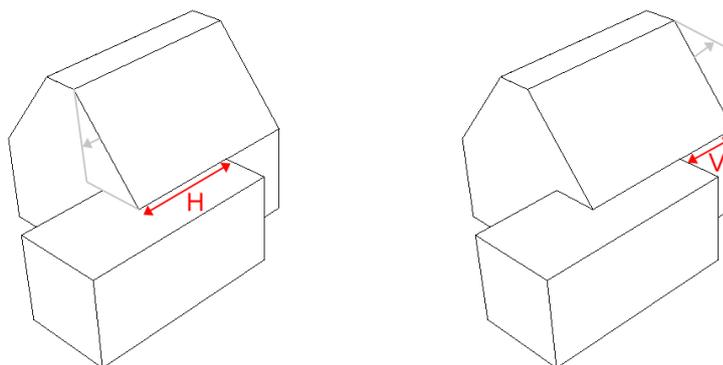


Abbildung 7.36: Eine Dachfläche ist an der Traufe verschiedenen Flächen benachbart. Dies hätte unterschiedliche Taperkanten und -richtungen zur Folge. Die Orthogonalisierung schlägt fehl.

Objekt individuell und intuitiv, Regeln für das Verhältnis zwischen beiden sind bisher aus der Literatur nicht bekannt. Für eine automatische Bestimmung der beiden Maßstabsparameter ist es sinnvoll, eine Strukturerkennung hinzuzuziehen.

Die Ergebnisse aus Dachorthogonalisierung und Parallelverschiebung für die Gebäude in Abbildung 7.37, 7.38 und 7.39 sind für die gewählten Maßstabsparameter zufriedenstellend. Beim letzten Beispiel erfolgt zunächst nur eine (optische) Angleichung ohne Polygonreduzierung, dann werden Kleinformen eliminiert und schließlich erfolgt die Orthogonalisierung des Daches.

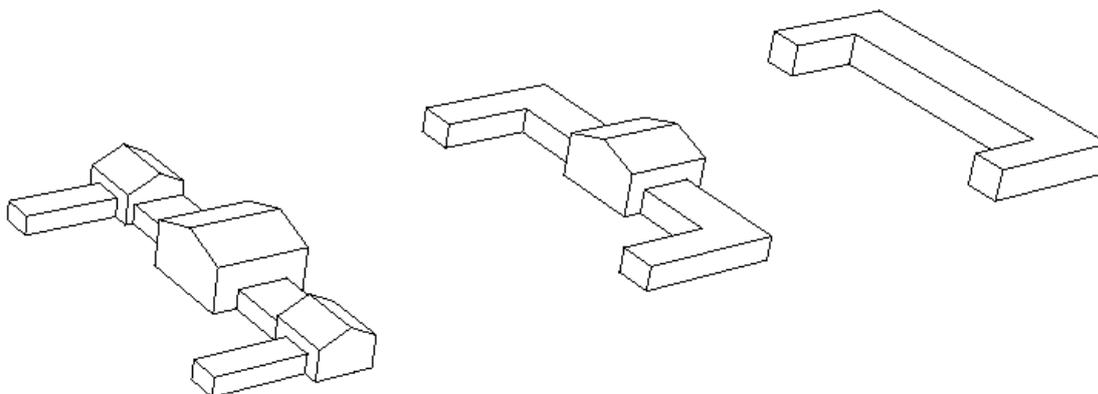


Abbildung 7.37: Maßstabsparameter von links nach rechts: $20m^2/1m$, $40m^2/1,5m$

Das Ergebnis in Abbildung 7.40 ist grundlegend annehmbar. Aus semantischen Gesichtspunkten würde der Turm aber u.U. beibehalten werden. Hier müsste zunächst, z.B. auf Basis des in (ELIAS 2003) beschriebenen Ansatzes, bestimmt werden, dass es sich um ein „Landmark“, d.h. ein hervorstechendes, für die Orientierung wichtiges Objektmerkmal handelt, das bei der Generalisierung nicht angetastet werden darf.

In Abbildung 7.41 wird im ersten Schritt das Satteldach des Anbaus in ein Flachdach umgewandelt, dann erfolgen Parallelverschiebungen für die am Vorsprung liegenden parallelen Flächen. Hierbei tritt neben dem bereits in Abbildung 7.5 für mathematische Morphologie dargestellten Effekt der Knotenaufspaltung an Knoten mit mehr als drei angrenzenden Kanten ein weiteres Problem auf. Da die zu verschiebenden Flächen größtmäßig wenig voneinander abweichen, werden sie gleichermaßen verschoben. Weil die eine Fläche an die Traufe einer

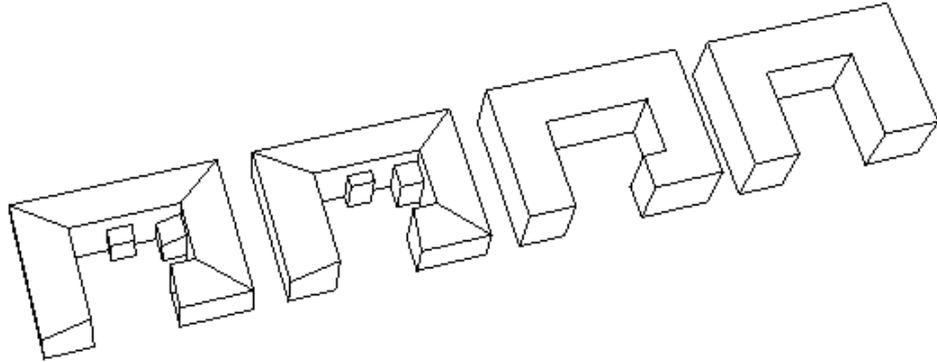


Abbildung 7.38: Maßstabsparameter von links nach rechts: $10m^2/0m$, $100m^2/1,5m$, $1000m^2/3m$

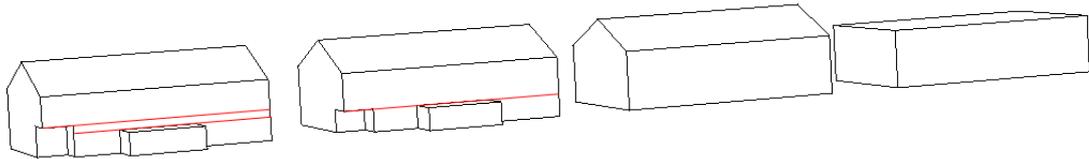


Abbildung 7.39: Im ersten Schritt erfolgt nur eine (optische) Angleichung, keine Flächenreduktion (siehe rote Linien). Maßstabsparameter von links nach rechts: $10m^2/3m$, $100m^2/4m$, $1000m^2/5m$

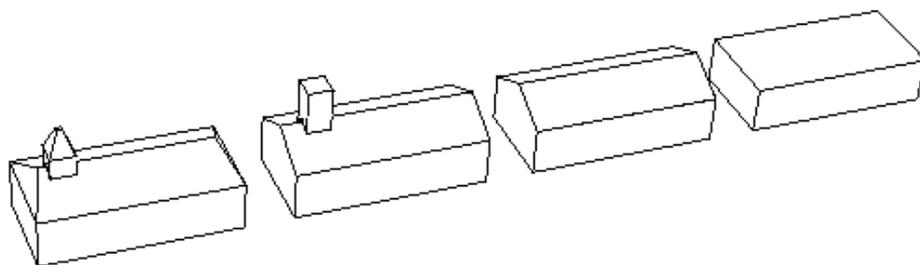


Abbildung 7.40: Maßstabsparameter von links nach rechts: $2m^2/0,5m$, $10m^2/2m$, $100m^2/3m$

geneigten Dachfläche grenzt, wird die Traufe bei der Flächenbewegung entsprechend der Neigung der Dachfläche nach unten verschoben. Der daraus resultierende Effekt ist in Abbildung 7.41 verdeutlicht. Eine Lösung bestünde darin, bei einem Flächenpaar, bei welchem eine der Flächen an eine geneigte Dachfläche grenzt, nur die andere Fläche zu bewegen. Dies könnte ähnlich wie die Bedingung, dass bei deutlichem Größenunterschied nur die kleinere Fläche bewegt wird, als Bedingung in die Generalisierung eingebracht werden, wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

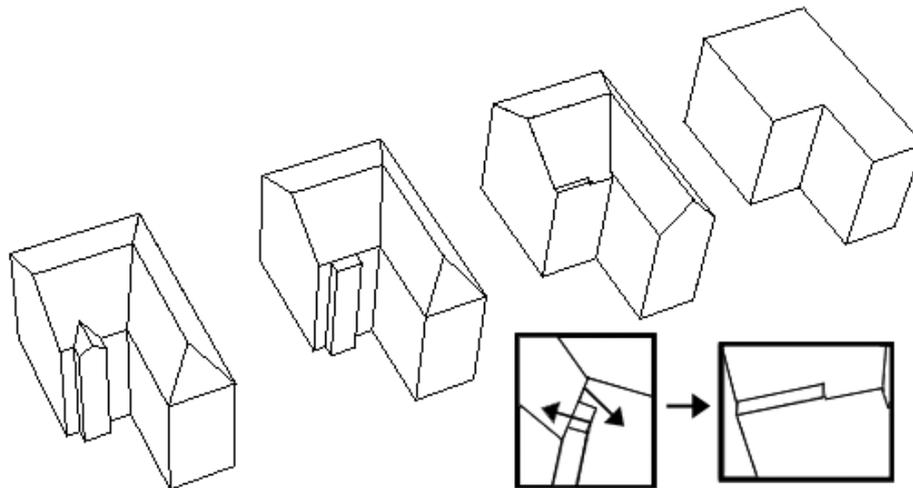


Abbildung 7.41: Problem bei unterschiedlicher Orientierung der angrenzenden Flächen für die Parallelverschiebung; Maßstabsparameter von links nach rechts: $20m^2/1m$, $100m^2/2,5m$, $1000m^2/5m$

Abbildung 7.42 kombiniert die in Abbildung 7.33 dargestellte Orthogonalisierung einer Gaube mit der Vereinfachung durch Parallelverschiebung. Der Schritt vom Ausgangsmodell zum letzten Maßstab ist annehmbar, die Zwischenschritte sind aber nicht akzeptabel.

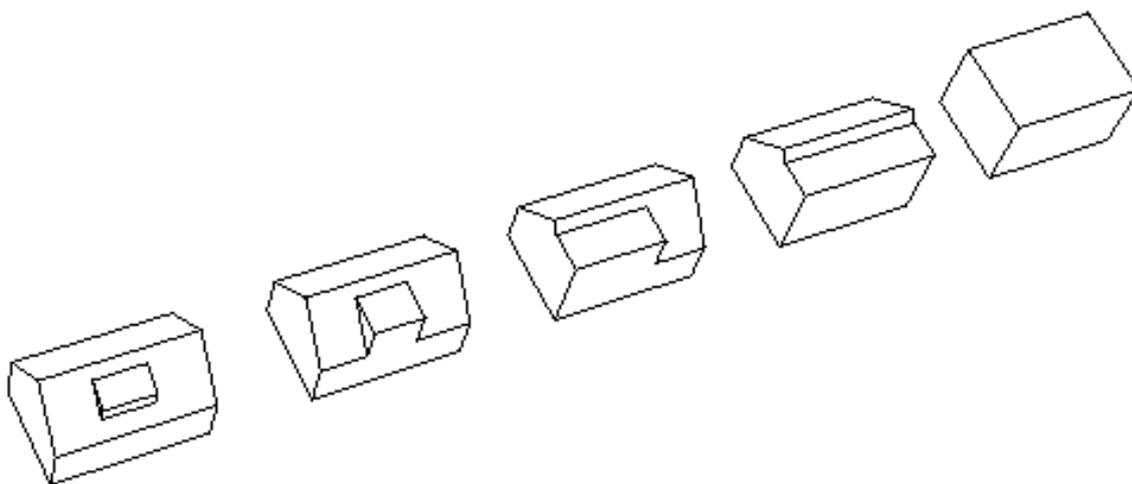


Abbildung 7.42: Die Handhabung von Gauben kann problematisch sein; Maßstabsparameter von links nach rechts: $5m^2/0,5m$, $10m^2/1m$, $15m^2/1,5m$, $20m^2/2m$

Eine sinnvolle Elimination der Gaube durch Parallelverschiebung wäre nur dann möglich, wenn die seitlichen, dreieckigen Flächen parallel sind und unter der minimalen Distanz liegen. In dem gegebenen Fall liegt die Fensterfront aber näher an der Hauswand. Dies führt zu dem dargestellten ungünstigen Ergebnis. Unter Generalisierungsaspekten ist dies eine Schwachstelle in dem vorgeschlagenen Verfahren. Eine Lösung wäre, innerhalb der geneigten Flächen nach Löchern, also inneren Schleifen (siehe Abschnitt 2.1.2), zu suchen und die Flächen innerhalb dieser Schleifen zu löschen. Die Bedingungen hierfür müssten noch festgelegt werden. Außerdem funktioniert dies nur, wenn die Gaube erkannt wird, d.h. wenn sie ganz von der sie enthaltenden Dachfläche umgeben ist. Liegt die Gaube schlüssig am Rand der Dachfläche, ist sie nicht als innere Schleife erkennbar und es findet keine Vereinfachung statt. Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, die Gauben schon im Rahmen der Dachorthogonalisierung zu eliminieren, indem die geneigte Fläche einer Gaube in die Ebene der die Gaube enthaltenden, größeren Dachfläche rotiert wird. Aber auch hier müssen die Gauben zunächst erkannt und auf der Basis von noch zu bestimmenden Bedingungen für eine potenzielle Elimination ausgewählt werden.

7.6 Bewertung der Ergebnisse und mögliche Erweiterungen des Ansatzes

In dieser Arbeit wird ein Ansatz bestehend aus unterschiedlichen Verfahren zur geometrischen und topologischen Vereinfachung von polyederförmigen 3D Gebäudemodellen vorgestellt. Eine Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum und die damit in Konkurrenz stehende Parallelverschiebung werden anhand verschiedener Gebäudemodelle auf Ihre Eignung zur Vereinfachung orthogonaler Strukturen untersucht. Für die Handhabung nicht orthogonaler Strukturen, hier mit Fokus auf geneigten Dachstrukturen, wird außerdem ein Verfahren zur Orthogonalisierung vorgeschlagen und anhand verschiedener Beispiele getestet.

Mathematische Morphologie und Krümmungsraum sind aufgrund der inkrementellen Verschiebung der Flächen rechenaufwändig und damit langsam. Bei der Parallelverschiebung hängt die Zahl der Iterationen von der Zahl der parallelen Flächen, genauer von der Zahl der für die Generalisierung notwendigen Maßstabsraumereignisse ab. Meist ist diese Zahl klein und die Rechenzeit dadurch sehr kurz. Abgesehen davon sind die nötigen Berechnungen einfach und allgemein, während beim Krümmungsraum komplizierte Analysen der Konvexität bzw. Konkavität einzelner Elemente ausgeführt werden müssen, für die zudem in der hier angegebenen Form kein Beweis für Vollständigkeit besteht.

Die Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum liefert teilweise Ergebnisse, die einer manuellen Vereinfachung näher kommen als die Ergebnisse der Parallelverschiebung (siehe z.B. Abb. 7.3 im Vergleich zu Abb. 7.25). In erster Linie liegt dies an der separaten Handhabung verschiedener Maßstabsraumereignisse. Durch die getrennte Anwendung von mathematischer Morphologie und Krümmungsraum erfolgen, vorausgesetzt, die mathematische Morphologie wird vor dem Krümmungsraum angewendet, externe Ereignisse vor jenen Ereignissen, die Treppen- oder Boxstrukturen eliminieren. Aus kartographischem Gesichtspunkt ist es sinnvoll, das Schließen einer Lücke vor die Vereinfachung einer lokalen Struktur (Treppe oder Box) zu setzen.

Die angedeutete Hierarchie der Maßstabsraumereignisse kann aber auch in die Parallelverschiebung integriert werden. Hierfür stehen drei verschiedene Normalenrelationen und die dazu gehörenden Ereignisse zur Auswahl: aufeinander zu gerichtete Normalen und das Schließen von Lücken, voneinander weg gerichtete Normalen und die Aufspaltung oder Elimination von Elementen geringer Breite sowie Normalen gleicher Ausrichtung und die Formvereinfachung, oft in Form einer Glättung (siehe Abb. 7.43).

Die Hierarchie sollte ein Schließen von Lücken vor die Formvereinfachung setzen und eine Aufspaltung/Elimination als letzte Aktion vorsehen. Wenn für die unterschiedlichen Hierarchiestufen unterschiedliche Maßstabsparameter verwendet werden, kann das Erscheinungsbild des vereinfachten Gebäudes verbessert werden. Zusätzlich könnte auch die Flächengröße als Kriterium einbezogen werden. So wäre es sinnvoll, zunächst Paare mit kleiner

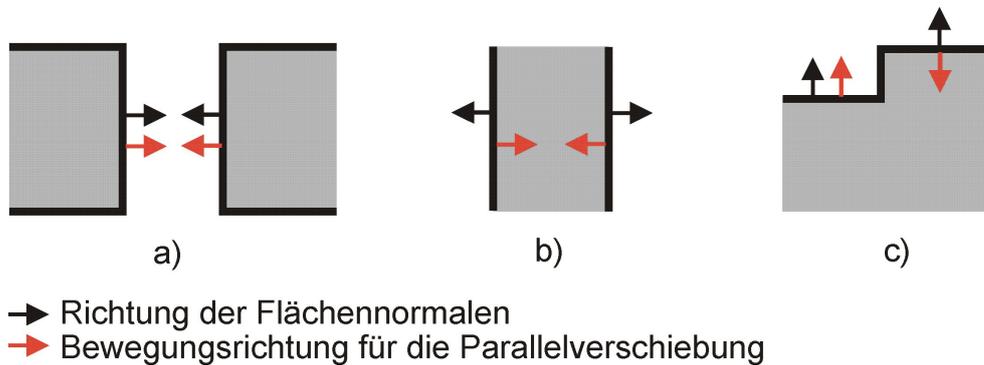


Abbildung 7.43: Ereignisse bei der Parallelverschiebung a) Schließen von Lücken, b) Aufspaltung oder Elimination c) Formvereinfachung, Glättung

Flächensumme zu bewegen. Auf diese Art werden kleinere Strukturen vor großen und daraus resultierend auch oft innere vor äußeren Strukturen vereinfacht. Unklar ist allerdings, wie Flächengröße und Abstand der Flächen für die Entscheidung, welches Paar zuerst vereinfacht werden soll, gewichtet werden sollen.

Das vorgestellte Verfahren zur Dachorthogonalisierung liefert brauchbare Ergebnisse für eine große Auswahl an verschiedenen Dachtypen und Kombinationen verschiedener Dachstrukturen. Voraussetzung für das Verfahren sind horizontale Traufen und Firste. Sind diese nicht horizontal, so werden sie in der bisherigen Implementierung nicht erkannt und eine Orthogonalisierung ist nicht möglich. Hat die Dachfläche an der der Traufe oder dem First entsprechenden Kante mehr als eine Nachbarfläche, kann aufgrund der in dieser Arbeit vorgeschlagenen limitierten Menge an Nachbarschaftsbeziehungen keine Entscheidung über Kante und Richtung für das Tapering getroffen werden und es findet keine Generalisierung statt. Firste, die durch einen einzelnen Knoten statt durch eine Kante beschrieben werden, wie sie z.B. in den dreieckigen Dachflächen eines Walmdaches vorkommen, bilden hier eine Ausnahme. Weiterhin ist eine Funktion zur Höhenskalierung nach der Orthogonalisierung notwendig. Problematisch ist dies bei Gebäuden mit lokalen geneigten Dachstrukturen. Für Dachflächen mit Gauben ist eine separate Lösung, wie z.B. die Löschung der Flächen einer inneren Schleife (Gaubenflächen) oder die Rotation einer kleineren Dachfläche in die Ebene einer größeren Dachfläche, anzustreben. Insgesamt bietet das Verfahren einen relativ allgemeinen Ansatz zur Dachorthogonalisierung, der einfach erweitert werden kann, sodass die angesprochenen Probleme gelöst oder zumindest verringert werden können.

Der hier vorgestellte Ansatz zur Vereinfachung paralleler Strukturen und zur Elimination von geneigten Strukturen wurde mit manuell ausgewählten Maßstabsparametern getestet. Für die Dachorthogonalisierung beschreibt der Maßstabsparameter den durchschnittlichen Flächeninhalt einer Dachstruktur, für die Parallelverschiebung die Distanz zwischen zwei parallelen Flächen. Letztere hat sich als relativ gut geeignetes Maß für die Wertigkeit einer Struktur innerhalb der Vereinfachung erwiesen. Ein volumenabhängiger Maßstabsparameter hat dagegen verschiedene Nachteile. Zum einen zeigen die Experimente, dass intuitiv in vielen Fällen ein Ergebnis vorzuziehen ist, bei dem eine größere Volumenänderung stattfindet. Eine volumenabhängige Generalisierung wäre hier kontraproduktiv. Zum anderen wäre eine Erkennung einzelner, volumetrisch bestimmbarer und semantisch sinnvoller Struktureinheiten nötig. Dies ist nicht trivial. Der Flächenabstand bietet dagegen ein praktisch zufriedenstellendes und vor allem einfach zu bestimmendes Kriterium.

Eine geeignete Gewichtung zwischen den verschiedenen Maßstabsparametern wird hier nicht gegeben. Die Maßstabsparameter für die Experimente wurden intuitiv und für jedes Beispiel individuell gewählt. Um die Auswahl der Maßstabsparameter ebenfalls zu automatisieren, müssten die Ziele und Anforderungen, die ein Nutzer an das Generalisierungsergebnis hat, intensiver erforscht werden. Wahrscheinlich müssten Regeln bestimmt wer-

den, welche die Interaktion verschiedener Objektteile, wie z.B. Wände und Dächer, bei der Generalisierung festlegen. Zusätzlich müssten Regeln das subjektive Empfinden, z.B. in Bezug auf Symmetrie, beschreiben. Als Grundlage müssten mittels Strukturerkennung die verschiedenen Objektteile bestimmt werden, auf die sich die Regeln beziehen.

7.7 Vergleich mit anderen Arbeiten

Die Vereinfachung von 3D Objekten, welche auf die Erhaltung der spezifischen Eigenschaften von Gebäuden ausgerichtet ist, ist ein Forschungsgebiet, das zwar an Bedeutung zunimmt, bisher aber erst am Anfang steht. Neben der vorgestellten Arbeit und der in ihrem Rahmen erstellten Publikationen (FORBERG und MAYER 2002), (FORBERG und MAYER 2003), (FORBERG 2004a) und (FORBERG 2004b) gibt es in erster Linie die in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Arbeiten von Thiemann und Kada, welche sich ebenfalls, allerdings mit anderen Herangehensweisen, mit der Vereinfachung von 3D Gebäudedaten beschäftigen. Beide Verfahren befinden sich zur Zeit in der Entwicklungsphase. Für den Ansatz von Thiemann ist die Segmentierung nach (RIBELLES et al. 2001) bereits implementiert, die praktische Umsetzung der eigentlichen Generalisierung ist aber noch nicht erfolgt (THIEMANN und SESTER 2004). Ein Gebäude soll dafür in semantisch sinnvolle Primitive, wie z.B. Balkone, Gauben etc. unterteilt werden, die je nach Maßstab angezeigt oder ausgeblendet werden.

Bei dem Ansatz von Kada erfolgt eine Klassifizierung in bestimmte Strukturen, welche im Gegensatz zu Thiemanns Ansatz keine semantischen, sondern rein geometrisch-topologische Einheiten darstellen. Bisher ist der Ansatz auf drei Strukturen, nämlich Ausbuchtungen, Kerben und Spitzen, limitiert. Diese werden bei der Generalisierung unterschiedlich eliminiert. Eine Ausweitung des Ansatzes auf weitere 3D Strukturen ist laut (KADA 2003) geplant.

Beide Verfahren sind auf die Behandlung einer festgelegten Menge an Strukturen beschränkt, welche in Thiemanns Fall als geschlossene Primitive repräsentiert werden und zusätzlich mit semantischer Bedeutung belegt sind. Die semantische Klassifizierung einzelner Strukturen ist für eine semantisch konsistente Generalisierung sinnvoll. Allerdings ist die Fülle an möglichen 3D Strukturen in Gebäudemodellen zu bedenken, und die sich daraus ergebenden Schwierigkeiten, geeignete semantische Einheiten zu definieren sowie alle Strukturen der jeweils richtigen semantischen Einheit zuzuordnen. Im Gegensatz zu Thiemann und Kada wird bei dem hier vorgestellten Ansatz nur grob in Wand- und Dachebene unterschieden, was Probleme mit der Bedeutung der Strukturen stark reduziert.

Beim vorgestellten Ansatz wird für die Vereinfachung der Wandebene die exakte Parallelität der Flächen gefordert. Dies erfordert für reale Daten zwingend eine Vorverarbeitung in Form einer Wandorthogonalisierung. Die Ansätze von Thiemann und Kada erfordern keine streng parallelen Strukturen. Bei Thiemann werden jedoch den Gebäudeflächen entsprechende Schnittebenen benötigt, um Objektteile zu segmentieren. Auf diese Weise können auch nicht parallele Strukturen wie Dachvorsprünge (siehe Abb. 7.44) erkannt und behandelt werden. Dachvorsprünge sind in dem hier entwickelten Verfahren nicht berücksichtigt und sollten daher zur Vervollständigung in die Dachorthogonalisierung integriert werden. Kadas Ansatz benötigt nur genähert orthogonale oder parallele Strukturen, da die Orthogonalität bzw. Parallelität im Ausgleichsprozess erzwungen wird. Für die notwendige Vorverarbeitung der Wandflächen für den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Ansatz könnte die von Kada verwendete 3D Ausgleichung als Basis dienen.

In der vorliegenden Arbeit werden aus unterschiedlichen Dacheinheiten bestehende Dächer behandelt, welche bei den anderen beiden Ansätzen bisher vernachlässigt wurden. Die Elimination einer kompletten Dachlandschaft ist bei Thiemanns Ansatz nicht möglich, da der Ebene, mit der das Objekt geschnitten werden müsste, keine

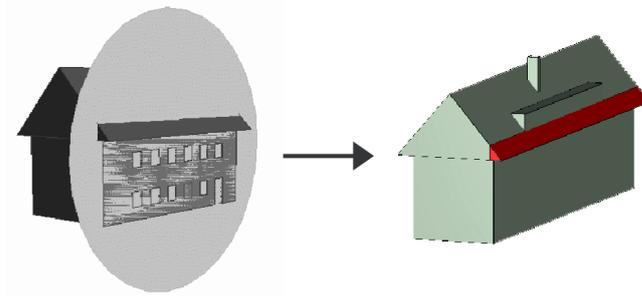


Abbildung 7.44: Beim Ansatz von Thiemann kann durch die Verschneidung mit einer Flächenebene (THIEMANN und SESTER 2004) (links) der Dachvorsprung selektiert (THIEMANN 2003) (rechts) und entfernt werden.

der vorhandenen Objektflächen entspricht. Bei Kadas Ansatz ist die Behandlung großflächiger Dachstrukturen denkbar. Allerdings wäre eine umfangreiche Auswahl an Strukturen inklusive Methoden für ihre Behandlung notwendig.

Alle drei Ansätze besitzen weiteres Potenzial für die Vereinfachung von 3D Gebäudedaten. Der hier vorgestellte Ansatz bietet für parallele Strukturen eine große Flexibilität ohne den Zwang der Zuordnung zu einer großen Zahl von vorher zu definierenden Klassen. Eine Klassifizierung erfolgt nur für die Orthogonalisierung der Dachebene, welche bisher weder bei Thiemann noch bei Kada berücksichtigt wurde. Die Trennung beider Ebenen bietet die Möglichkeit, Dächer und Wände entsprechend ihrer unterschiedlichen Semantik unterschiedlich zu handhaben. Bei Thiemann und Kada werden außerdem nur einzelne Objektteile eliminiert oder aufgefüllt. Eine Glättung lokaler Strukturen, wie sie bei dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansatz stattfindet, ist nicht vorgesehen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die verstärkte Nutzung von Computern gewinnen 3D Stadtmodelle für die Repräsentation räumlicher Strukturen immer mehr an Bedeutung, da sie den Nutzer durch ihre interaktiven Visualisierungsmöglichkeiten vom festen Blickpunkt vorgegebener Karten befreien. Aufgrund der Vielfalt ihrer Anwendungsgebiete werden 3D Stadtmodelle in den unterschiedlichsten Maßstäben benötigt. Um eine Neuerfassung zu vermeiden, werden aus einem gegebenen detaillierten Modell weniger detaillierte Modelle abgeleitet, was als Generalisierung oder Vereinfachung bezeichnet wird. Während sich eine Reihe von Arbeiten mit der Vereinfachung allgemeiner 3D Objekte mit hoher Polygondichte beschäftigen, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der bisher wenig erforschten automatischen Vereinfachung von 3D Gebäuden. Im Gegensatz zu vielen anderen Objekten bestehen Gebäudemodelle überwiegend aus ebenen und rechtwinkligen Strukturen. Die damit verbundenen spezifischen Eigenschaften, wie z.B. Parallelität von Flächen, ermöglichen und legen andersartige Vereinfachungsalgorithmen als z.B. für die Reliefvereinfachung nahe. Die vorliegende Arbeit schlägt Ansätze vor, mit denen aus einem detailreichen Modell eines Einzelgebäudes oder einfachen Gebäudeensembles Modelle mit geringerem Detaillierungsgrad abgeleitet werden können.

Inspiziert durch verschiedene Verfahren, die im Rahmen der so genannten Maßstabsraumtheorie entwickelt wurden, wurden zwei unterschiedliche Ansätze zur Vereinfachung orthogonaler bzw. paralleler Strukturen entwickelt. Der zuerst ausgearbeitete Ansatz basiert auf einer Kombination von mathematischer Morphologie und Krümmungsraum, welche auf rechtwinklige Vektordaten angepasst und in die dritte Dimension übertragenen wurden. Bei der mathematischen Morphologie werden alle Flächen gleichmäßig in oder entgegen der Richtung ihrer Normalen bewegt, bis durch das Aufeinandertreffen von Flächen mit entgegengesetzter Normalen eine Verschmelzung von Flächen stattfindet. Für den Krümmungsraum ist eine komplexe Analyse der Konkavität bzw. Konvexität lokaler Strukturen notwendig. Aufgrund dieser Analysen werden einzelne Flächen so bewegt, dass sie in der Ebene einer parallelen Fläche in einer Kante oder einem Knoten zusammenfallen. Durch die komplexen Analysen und die inkrementelle Natur des Verfahrens ist die Rechenzeit sehr hoch. Aus diesen Gründen und basierend auf den Erfahrungen mit dem ersten Ansatz wurde ein weiterer Ansatz entwickelt, welcher einer weniger komplexen Theorie folgt. Es wird nach parallelen Flächen gesucht. Liegt die Distanz zwischen ihnen unter einem den Maßstab beschreibenden Schwellwert, werden die Flächen so gegeneinander bewegt, dass sie in einer Ebene miteinander verschmelzen. Dies führt entweder zu einer Angleichung oder meist zu einer Reduktion der Zahl der Flächen.

Die durchgeführten Experimente zeigen die Vor- und Nachteile beider Ansätze. Die Kombination aus mathematischer Morphologie und Krümmungsraum ist sehr langsam, führt aber bedingt durch die sequenzielle Anwendung von Verfahren, die für die Vereinfachung unterschiedlicher Strukturen geeignet sind, in vielen Fällen zu einem intuitiv akzeptablen Generalisierungsergebnis. Das Schließen von Lücken erfolgt aufgrund der Reihenfolge der Verfahren vor der Elimination von Treppen- oder Boxstrukturen. Für die Parallelverschiebung wurde diese Hierarchie zwischen unterschiedlichen Strukturtypen angedacht, aber bisher nicht in den Ansatz integriert, was die Resultate teilweise weniger intuitiv erscheinen lässt. Vorteilhaft ist bei der Parallelverschiebung, dass Objektteile nicht zwingend komplett eliminiert oder aufgefüllt werden müssen, sondern stattdessen eine Glättung der Strukturen stattfinden kann. Die Parallelverschiebung ist weniger komplex und dadurch wesentlich schneller als die Kombination aus zwei inkrementellen Verfahren.

Da beide beschriebene Ansätze nur für die Vereinfachung exakt rechtwinkliger Strukturen bzw. paralleler Flächen geeignet sind, sind für die Handhabung nicht orthogonaler Strukturen separate Verfahren anzuwenden. Die Orthogonalisierung erfolgt in der vorgestellten Arbeit wegen der unterschiedlichen Charakteristika der Strukturen für Dächer und Wände getrennt.

Für die Orthogonalisierung der Dächer wird ein Ansatz vorgeschlagen, bei dem die geneigten Dachflächen durch Rotation um Traufe oder First in eine horizontale oder vertikale Richtung gebracht werden. Die Wahl der Rotationskante und -richtung für eine einzelne Dachfläche wird aufgrund ihrer Relationen zu der an die Traufe und der an den First angrenzenden Flächen getroffen. Die Wahl der Flächen, welche eine zusammenhängende Dachstruktur (Dacheinheit) bilden und daher gemeinsam orthogonalisiert werden müssen, hängt von Berührungspunkten zwischen den Firstkanten ab. Der Ansatz zeigt bei den Experimenten, dass er für verschiedenste Dachformen gut geeignet ist, aber auch Defizite in Form nicht einheitlicher Dachhöhen nach der Rotation der Flächen, störender Strukturen bei der Handhabung von Gauben und des Versagens des Ansatzes bei Dachflächen, deren Traufe oder First an unterschiedliche Flächen angrenzt, aufweist.

Die Flächen der Wände streben bei der Orthogonalisierung die ihnen am nächsten gelegenen Hauptrichtungen an. Letztere können innerhalb der Projektion aller vertikaler Flächen eines Gebäudes in die x-y-Ebene analog zu 2D Verfahren bestimmt werden. Die Wandorthogonalisierung wurde in dieser Arbeit wegen ihrer hohen Komplexität nicht realisiert.

Die Generalisierung von 3D Daten befindet sich am Anfang der Entwicklung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem kleinen Teil der vielfältigen Aufgabengebiete, nämlich der Vereinfachung einzelner, einfach strukturierter Gebäude mit idealer Geometrie. Neben der Vereinfachung einzelner Gebäude ist mit den vorgestellten Verfahren eine Zusammenfassung unterschiedlicher Gebäude zu Gebäudeblöcken möglich (siehe z.B. Abb. 7.12). Für die Zusammenfassung von komplexen Gebäuden mit geneigten Dächern sind aber zusätzliche Forschung und eine eingehende Strukturerkennung und Charakterisierung der Gebäude und deren Relationen untereinander notwendig. Arbeiten zur Strukturerkennung mit Fokus auf 3D Gebäuden sind in (LAL 2003) und (LAL 2004) dargestellt. Aus der vorliegenden Arbeit ergeben sich weitergehende Forschungsfelder. Diese umfassen die Erweiterung der Parallelverschiebung und der Dachorthogonalisierung sowie die Umsetzung der Wandorthogonalisierung und eine umfassende Untersuchung der Interaktionen zwischen den Ansätzen, vor allem in Bezug auf die verwendeten unterschiedlichen Maßstabsparameter. Spezifisch ergeben sich für ein praktisch einsatzfähiges Werkzeug zur Gebäudevereinfachung die folgenden Aufgaben:

- Erweiterung der Parallelverschiebung um die Berücksichtigung einer Hierarchie zwischen den unterschiedlichen Arten von Maßstabsraumereignissen, d.h. zwischen Schließen von Lücken, Glättung, Elimination und Aufspaltung lokaler Strukturen (siehe Abb. 7.43).
- Weiterentwicklung der Dachorthogonalisierung in Bezug auf
 - die Handhabung von Gauben bzw. unterschiedlich geneigter Dachflächen,
 - eine Höhenskalierung, welche auch bei lokal begrenzten Dachstrukturen anwendbar ist, sowie
 - die Erweiterung der Relationen für die Wahl der Rotationskante und -richtung, so dass auch Flächen mit mehr als einer an die Traufe oder den First angrenzenden Nachbarfläche zur Dachfläche orthogonalisiert werden können.
- Umsetzung der Wandorthogonalisierung zur Bereinigung der Daten vor Beginn der Generalisierung sowie als maßstabsabhängiger Bestandteil des Generalisierungsansatzes. Die Wandorthogonalisierung setzt sich zusammen aus der Bestimmung der Hauptrichtungen der in die x-y-Ebene projizierten Wandebenen und der Rotation auszuwählender Wandflächen um vertikale Kanten in die nächstgelegenen Hauptrichtungen.
- Untersuchung der Relationen zwischen den einzelnen Ansätzen der Generalisierung. Ziel ist die Festlegung von geeigneten Maßstabsparametern für die Dachorthogonalisierung, die Wandorthogonalisierung, das Schließen von Lücken, sowie die Glättung, Elimination und Aufspaltung lokaler Strukturen für eine große

Bandbreite unterschiedlicher Gebäudearten. Dies kann durch die Einbeziehung der Strukturerkennung unterstützt werden, welche die auftretenden Gebäudestrukturen und die jeweiligen Merkmale, an denen sie zu erkennen sind, beschreibt. Darauf aufbauend kann die Art und Relevanz der Strukturen für die Generalisierung festgelegt und bestimmt werden, wie die Generalisierung gesteuert wird. Umgekehrt kann auch die Generalisierung wichtige Vorarbeiten für die Erkennung von Strukturen leisten, da diese oft abhängig vom Maßstab sind.

Abbildung 8.1 skizziert den Ablauf einer Vereinfachung auf Grundlage der in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze nach Umsetzung der Wandorthogonalisierung.

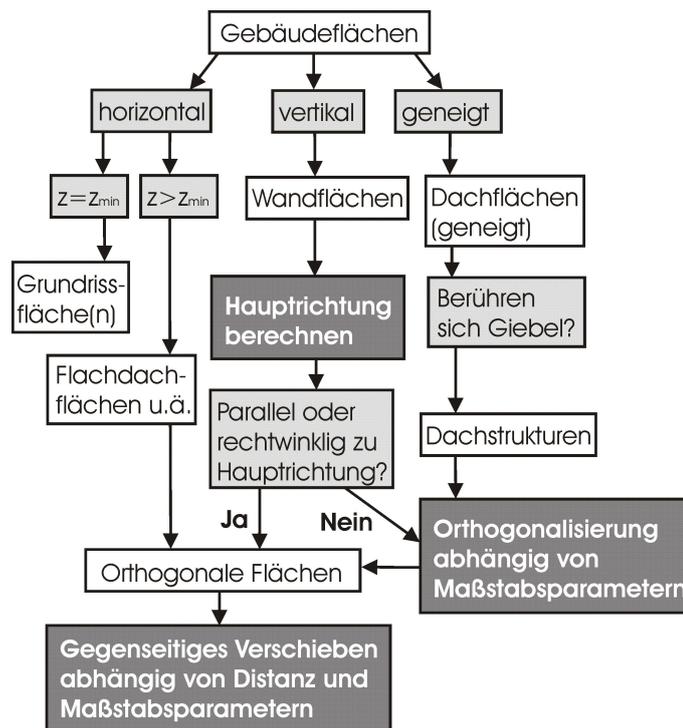


Abbildung 8.1: Ablaufschema für die Vereinfachung mit den vorgestellten Ansätzen unter der Voraussetzung, dass die Wandorthogonalisierung implementiert wäre

Eine intuitiv akzeptable Generalisierung benötigt umfassendes Wissen über die Wahrnehmung des Menschen. Wie groß und welcher Art dürfen die Abweichungen von einer exakten Symmetrie sein, damit eine Struktur trotzdem als symmetrisch empfunden wird? Bei welcher Größenrelation entscheidet ein Mensch, dass kleine Objektteile unbedeutend sind und damit entfernt werden oder dass eine größere Struktur aufgefüllt wird? Neben den geometrischen Problemen einer Generalisierung spielen also auch kognitive Aspekte eine Rolle. Gemessen an den Anforderungen der 3D Generalisierung und daran, dass die Erforschung Letzterer erst am Anfang steht, liefern die vorgestellten Ansätze vielversprechende Ergebnisse und bieten eine gute Basis für weitere Forschung.

Literaturverzeichnis

- ALBERT, J., BACHMANN, M. und HELLMMEIER, A. (2003): Zielgruppen und Anwendungen für Digitale Stadtmodelle und Digitale Geländemodelle, *Erhebungen im Rahmen der Arbeitsgruppe 'Anwendungen und Zielgruppen' der SIG3D im Rahmen der Initiative GDI-NRW*, <http://www.ikg.uni-bonn.de/sig3d>.
- ALBERTZ, J. (2001): *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- BADER, M. und WEIBEL, R. (1997): Detection and Resolving Size and Proximity Conflicts in the Generalization of Polygonal Maps, *International Cartographic Conference*, Band III, 1525–1532.
- BEHR, F. J. (1998): *Strategisches GIS-Management - Grundlagen und Schritte zur System Einführung*, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BELL, M., NEUFFER, D. und WOODSFORD, P. (2004): Agent-Based Generalisation - an Update on Progress, *Kartographische Nachrichten*, Band 4/2004, Kirsch Baum Verlag, Bonn, 170–178.
- BENDER, M. und BRILL, M. (2003): *Computergrafik*, Carl Hanser Verlag, München.
- BIAN, L. (1997): Multiscale Nature of Spatial Data in Scaling Up Environmental Models, *Quattrochi, D. and Goodchild, M. Hrsg., Scale in Remote Sensing and GIS*, Lewis Publishers, 13–26.
- BOBZIEN, M. und MORGENSTERN, D. (2002): Geometry-type change in model generalization a geometrical or a topological problem?, *Joint ISPRS/ICA Workshop on Multi-Scale Representations of Spatial Data*, Ottawa, Canada.
- BRACHMAN, R. (1979): On the Epistemological Status of Semantic Networks, *Associative Networks*, Academic Press, New York, USA, 191–215.
- BRENNER, C. und HAALA, N. (2000): Erfassung von 3D Stadtmodellen, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2/00**: 109–117.
- BURGHARDT, D. (2001): *Automatisierung der Kartographischen Verdrängung mittels Energieminimierung*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 536, München.
- BURGHARDT, D. und MEIER, S. (1997): Cartographic Displacement Using the Snakes Concept, *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, 59–71.
- BURT, P. und ADELSON, E. (1983): The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code, *Readings in Computer Vision*, Morgan Kaufmann Publishers, inc., Los Altos, California, USA, 671–679.
- CÁMARA, M. und LÓPEZ, F. (2000): Mathematical Morphology Applied to Raster Generalization of Urban City Block Maps, *Cartographica* **37**(1): 33–48.
- CASEY, J. (1996): *Exploring Curvature*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden.
- CHEN, M.-H. und YAN, P.-F. (1989): A Multiscaling Approach Based on Morphological Filtering, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **11**(7): 694–700.

- COORS, V. (2001): Feature-Preserving Simplification in Web-based 3D-GIS, *1. International Symposium on Smart Graphics*, Hawthorne, NY, USA.
- CORNEY, J. und LIM, T. (2001): *3D Modeling with ACIS*, Saxe-Coburg Publications, Stirling, Großbritannien.
- DAVIES, A. und SAMUELS, P. (1996): *An Introduction to Computational Geometry for Curves and Surfaces*, Clarendon Press, Oxford, Großbritannien.
- DOUGLAS, D. und PEUCKER, T. (1973): Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature, *Canadian Cartographer* **10**(2): 112–122.
- DUCHÊNE, C., BARD, S., BARILLOT, X., RUAS, A., TRÉVISAN, J. und HOLZAPFEL, F. (2003): Quantitative and Qualitative Description of Building Orientation, *Proceedings of the ICA, Fifth Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, Paris, Frankreich.
- DYN, N., HORMANN, K., KIM, S. und LEVIN, D. (2000): Optimizing 3D Triangulations using Discrete Curvature Analysis, *Mathematical Methods for Curves and Surfaces: Oslo 2000*, Vanderbilt University Press, Nashville, TN, Oslo, Norwegen.
- ELIAS, B. (2003): Determination of Landmarks and Reliability Criteria for Landmarks, *ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalisation*, Paris, Frankreich.
- FABER, A. (1997): Segmentierung und Klassifikation orthogonaler Straßennetze mittels Richtungskodierung, *Technical Report*, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn.
- FABER, A. und FÖRSTNER, W. (2000): Detection of Dominant Orthogonal Road Structures in Small Scale, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band (33) B3/1, 274–281.
- FORBERG, A. (2004a): Generalization of 3D Building Data Based on a Scale-Space Approach, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band (35) B4, Part B, 194–199.
- FORBERG, A. (2004b): Simplification of 3D Building Data, *ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Leicester, Großbritannien.
- FORBERG, A. und MAYER, H. (2002): Generalization of 3D Building Data Based on Scale-Spaces, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band (34) B4, 225–230.
- FORBERG, A. und MAYER, H. (2003): Squaring and Scale-Space Based Generalization of 3D Building Data, *ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalisation*, Paris, Frankreich.
- GALANDA, M. (2003): *Automated Polygon Generalization in a Multi Agent System*, Dissertation, Universität Zürich, Zürich, Schweiz.
- GALANDA, M. und WEIBEL, R. (2002): An Agent-Based Framework for Polygonal Subdivision Generalisation, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Ottawa, Kanada.
- GARLAND, M. und HECKBERT, P. (1997): Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, *SIGGRAPH '97*, 209–216.

- GÜLCH, E., MÜLLER, H. und LÄBE, T. (1999): Integration of Automatic Processes into Semi-automatic Building Extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band (32), 3-2W5, 177–186.
- GRÖGER, G. und KOLBE, T. (2003): Interoperabilität in einer 3D-Geodateninfrastruktur, *Münsteraner GI-Tage 2003*, Münster.
- GRUEN, A. und WANG, X. (1999): CyberCity Modeler, a Tool for Interactive 3D Model Generation, *Photogrammetric Week*, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- HAALA, N. (1996): *Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 460, München.
- HAALA, N., BRENNER, C. und ANDERS, K. H. (1997): Generation of City Models from Digital Surface Models and 2D GIS, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band (32), 3-4W2, 68–75.
- HAKE, G., GRÜNREICH, D. und MENG, L. (2002): *Kartographie - Visualisierung raum-zeitlicher Informationen*, de Gruyter, Berlin.
- HARALICK, R. und SHAPIRO, L. (1992): *Computer and Robot Vision*, Band I, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, USA.
- HATGER, C. und KREMEIKE, K. (2003): Interpretation und generalisierung dichter digitaler geländemodelle, *23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Band 12, 135–144.
- HECKBERT, P. und GARLAND, M. (1997): Survey of Polygonal Simplification Algorithms, *Multiresolution Surface Modeling Course SIGGRAPH '97*, www.cs.cmu.edu/~ph.
- KADA, M. (2002a): 3D-Generalisierung für die Echtzeitvisualisierung von Landschaftsmodellen, *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*, Band 11, 99–106.
- KADA, M. (2002b): Automatic Generalization of 3D Building Models, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band (34) 4, 243–248.
- KADA, M. (2003): 3D Building Generalization and Visualisation, *Fritsch, D. (ed.): Photogrammetric Week '03*, Stuttgart, 29–38.
- KIMIA, B., TANNENBAUM, A. und ZUCKER, S. (1995): Shapes, Shocks, and Deformations I: The Components of Two-Dimensional Shape and the Reaction-Diffusion Space, *International Journal of Computer Vision* **15**(3): 189–224.
- KLINGENBERG, W. (1973): *Eine Vorlesung über Differentialgeometrie*, Springer.
- KOENDERINK, J. (1984): The Structure of Images, *Biological Cybernetics* **50**: 363–370.
- KOLBE, T. und GRÖGER, G. (2003): Towards Unified 3D City Models, *ISPRS Commission IV, Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II*, Stuttgart.
- KÖTHE, U. (1996): Local Appropriate Scale in Morphological Scale-Space, *Fourth European Conference on Computer Vision*, Band I, 219–228.
- LAL, J. (2003): Aggregation on the Basis of Structure Recognition, *ICA Workshop on Progress in Automated Map generalisation*, Paris, Frankreich.

- LAL, J. (2004): 3D Building Recognition using Artificial Neural Network, *ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Leicester, Großbritannien.
- LATHAM, R. (1995): *The Dictionary of Computer Graphics and Virtual Reality*, Springer, New York, USA.
- LAUGWITZ, D. (1977): *Differentialgeometrie*, Teubner, Stuttgart.
- LI, Z. (1996): Transformation of Spatial Representation in Scale Dimension, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band (31) B3/III, 453–458.
- LINDBERG, T. (1994): *Scale-Space Theory in Computer Vision*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- MAYER, H. (1998a): *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 494, München.
- MAYER, H. (1998b): Three Dimensional Generalization of Buildings Based on Scale-Spaces, *Technical Report*, Chair for Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität München, www.photo.verm.tu-muenchen.de/b3d.
- MAYER, H. und STEGER, C. (1998): Scale-Space Events and Their Link to Abstraction for Road Extraction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **53**: 62–75.
- MCMMASTER, R. und SHEA, K. (1992): *Generalization in Digital Cartography*, Association of American Geographers, Washington, DC, USA.
- MENG, L. (1997): Automatic Generalization of Geographic Data, *Technical Report*, VBB Viak, Stockholm, Schweden, 129.187.92.218/publications/meng/paper/generalization1997.pdf.
- MENG, L. (2000): Vorstudien zum Adv-Forschungs- und entwicklungsvorhaben Atkis: Modell- und kartographische Generalisierung, *Project Report*, Lehrstuhl für Kartographie, Technische Universität München.
- MENG, L. (2002): Generalisierung von Geodaten - Notwendigkeiten, Möglichkeiten und Hemmnisse, *Kartographische Nachrichten*, Band 1/2002, Kirsch Baum Verlag, Bonn, 1–13.
- METZLER, V., THIES, C. und AACH, T. (2002): A Novel Object-Oriented Approach to Image Analysis and Retrieval, *5th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, 14–18.
- METZLER, V., THIES, C. und LEHMANN, T. (1999): Morphologische Multiskalenfilterung, *Bildverarbeitung für die Medizin 1999*, Springer, Berlin, 367–371.
- MEYER, U. (1989): *Generalisierung der Siedlungsdarstellung in digitalen Situationsmodellen*, Band 159, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover.
- MÄNTYLÄ, M. (1988): *An Introduction to Solid Modeling*, Computer Science Press, Rockville, Maryland, USA.
- MÜLLER, J., LAGRANGE, J. und WEIBEL, R. (Herausgeber) (1995): *GIS and Generalization – Methodology and Practice*, Taylor & Francis, London, Großbritannien.
- POPOVIĆ, J. und HOPPE, H. (1997): Progressive Simplicial Complexes, *SIGGRAPH '97*, 217–224.
- POWITZ, B. (1993): *Zur Automatisierung der kartographischen Generalisierung topographischer Daten in Geo-Informationssystemen*, Band 185, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover.

- RAINSFORD, D. und MACKANESS, W. (2002): Template Matching in Support of Generalisation of Rural Buildings, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band (34) B4, Ottawa, Kanada, 137–151.
- RAMER, U. (1972): An Iterative Procedure for the Polynomial Approximation, *Computer Graphics and Image Processing* 1: 244–256.
- REGNAULD, N., EDUARDES, A. und BARRAULT, M. (1999): Strategies in Building Generalization: Modelling the Sequence, Constraining the Choice, *Progress in Automated Map Generalization – ACI '99*.
- RIBELLES, J., HECKBERT, P., GARLAND, M., STAHOVICH, T. und SRIVASTAVA, V. (2001): Finding and Removing Features from Polyhedra, *ASME Design Engineering Technical Conferences*.
- ROSSIGNAC, J. (2001): 3D Compression Made Simple: Edgebreaker with Zip & Wrap on a Corner-Table, *Shape Modeling International*, 278–283.
- ROTTENSTEINER, F. und SCHULZE, M. (2003): Performance Evaluation of a System for Semi-Automatic Building Extraction using Adaptable Primitives, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band (34), 3/W8, München, 47–52.
- RUAS, A. (1999): The Role of Meso Level for Urban Generalisation, *ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, Ottawa, Kanada.
- RUAS, A. (2001): Automatic Generalisation Project: Learning Process from Interactive generalisation, *Technical report*, European Organization for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE), Official Publication No. 39.
- RUAS, A. und MACKANESS, W. (1997): Strategies for Urban Map Generalisation, *International Cartographic Conference*, Band III, 1387–1394.
- SCHILCHER, M., ROSCHLAUB, R. und GUO, Z. (1998): Vom 2D-GIS zum 3D-Stadtmodell durch Kombination von GIS-, CAD- und Animationstechniken, *Tagungsband ACS'98, Fachseminar Geoinformationssysteme*, Frankfurt am Main.
- SCHILING, A. und ZIPF, A. (2002): Automatisierte Integration und Visualisierung von verteilten 2D- und 3D-Geodaten am Beispiel einer virtuellen Stadttour, *Symposium für Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*, Salzburg, Österreich.
- SCHMALSTIEG, D. (1996): LODESTAR: An Octree-Based Level of Detail Generator for VRML, *Technical Report*, Institute of Computer Graphics, Visualization and Animation Group, Vienna University of Technology, Österreich.
- SCHOPPMAYER, J. und HEISSER, M. (1995): Behandlung von Geometriotypwechseln in GIS, *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* I(113): 209–224.
- SCHÜRER, D. und MORGENSTERN, D. (2004): Modellgeneralisierung - Theoretische Ansätze und Praktische Erfahrungen, *Kartographische Nachrichten*, Band 4/2004, Kirsch Baum Verlag, Bonn, 152–159.
- SERRA, J. (1982): *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London, Großbritannien.
- SESTER, M. (2001): *Maßstabsabhängige Darstellungen in digitalen räumlichen Datenbeständen*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 544, München.

- SESTER, M., KREMEIKE, K. und THIEMANN, F. (2004): Automatische Generalisierung Raumbezogener Datenbestände, *Kartographische Nachrichten*, Band 4/2004, Kirsch Baum Verlag, Bonn, 159–169.
- STAUFENBIEL, W. (1973): *Zur Automation der Generalisierung topographischer Karten mit besonderer Berücksichtigung großmaßstäblicher Gebäudedarstellungen*, Band 51, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover.
- STILLA, U., MICHAELSEN, E. und JURKIEWICZ, K. (1998): Structural Analysis of Right-Angled Building Contours, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band (32) 3/1, 379–386.
- SU, B., LI, Z., LODWICK, G. und MÜLLER, J.-C. (1997): Algebraic Models for the Aggregation of Area Features Based upon Morphological Operators, *International Journal of Geographical Information Science* **11**(3): 233–246.
- TER HAAR ROMENY, B. (2003): *Front-End Vision and Multi-Scale Image Analysis: Multi-Scale Computer Vision Theory and Applications, written in Mathematica*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande.
- THIEMANN, F. (2003): 3D-Generalisierung für die Echtzeitvisualisierung von Landschaftsmodellen, *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 11, 99–106.
- THIEMANN, F. und SESTER, M. (2004): Segmentation of Buildings for 3D-Generalisation, *ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*, Leicester, Großbritannien.
- VAN DEN BOOMGARD, R. und SMEULDERS, A. (1994): The Morphological Structure of Images: The Differential Equations of Morphological Scale-Space, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **16**(11): 1101–1113.
- VAN KREVELD, M. (2001): Smooth Generalization for Continuous Zooming, *Proceedings of the ICA, Fourth Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, Beijing, China.
- VARSHNEY, A., AGARWAL, P., BROOKS, F., WRIGHT, W. und WEBER, H. (1995): Generating Levels of Detail for Large-Scale Polygonal Models, *Technical Report CS-1995-20*, Department of Computer Science, Duke University, USA.
- VELHO, L. (2001): Mesh Simplification using Four-Face Clusters, *Shape Modeling International*, 200–208.
- WEIBEL, R. (1989): *Konzepte und Experimente zur Automatisierung der Reliefgeneralisierung*, Geoprocessing 15, Dissertation, Universität Zürich, Zürich, Schweiz.
- WEIBEL, R. (2004): Modellgeneralisierung und Kartographische Generalisierung - Stand und Entwicklung, *Kartographische Nachrichten*, Band 4/2004, Kirsch Baum Verlag, Bonn, 150–152.
- WEIDNER, U. (1997): *Gebäudeerfassung aus Digitalen Oberflächenmodellen*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 474, München.
- WITKIN, A. P. (1983): Scale-Space Filtering, *Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1019–1022.

Dank

Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. Helmut Mayer, Institut für Photogrammetrie und Kartographie (IPK) der Universität der Bundeswehr München (UniBwM), für die außergewöhnlich engagierte Betreuung der Arbeit, die stete Diskussionsbereitschaft und die vielen Anregungen während der Forschungen sowie bei der Fertigstellung der schriftlichen Ausarbeitung.

Prof. Dr. Liqiu Meng, Lehrstuhl für Kartographie (LFK) der Technischen Universität München (TUM), danke ich herzlichst für die Übernahme des zweiten Gutachtens sowie für die regelmäßigen Diskussionen während des gemeinsamen Projekts „Generalisierung von 3D Siedlungsstrukturen auf Grundlage von Maßstabsräumen und Strukturerkennung“. Dieses Gemeinschaftsprojekt von IPK und LFK wurde finanziell durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert, wofür ich der DFG danke.

Viele Denkanstöße erhielt ich auf den Workshops der International Cartographic Association (ICA) „Workshop on Progress in Automated Map Generalisation“ 2003 und „Workshop on Generalisation and Multiple Representation“ 2004. Allen Organisatoren und Teilnehmern danke ich hiermit für ihre Diskussionsfreude und ihr Interesse, welches mich jedes mal von neuem motiviert hat.

Für ein angenehmes Arbeitsumfeld und die auch fachlichen Diskussionen bedanke ich mich bei allen Mitgliedern des IPK sowie der Arbeitsgemeinschaft Geoinformationswesen (AGIS) des benachbarten Instituts für Geoinformation und Landmanagement.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Eltern, meinem Bruder und meinen Freunden für die emotionale Unterstützung bedanken. Die Arbeit widme ich Jörg Michael Weber, einem guten Freund, der die Vollendung dieser Arbeit leider nicht mehr miterleben durfte.